
DIPLOMARBEIT

Herr

Wolfgang Schuler

**Leichtbau in der
Automobilindustrie unter
besonderer Betrachtung des
Schaumspritzgießens**

Mittweida, 2015

DIPLOMARBEIT

Leichtbau in der Automobilindustrie unter besonderer Betrachtung des Schaumspritzgießens

Autor:

Herr

Wolfgang Schuler

Studiengang:

Wirtschaftsingenieurwesen

Seminargruppe:

KW10wIA-F

Erstprüfer:

Prof. Dr. rer. oec. Volker Tolkmitt

Zweitprüfer:

Prof. Dr. Dr. h. c. Hartmut Lindner

Einreichung:

Mittweida, 30.01.2015

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2015

DIPLOMA THESIS

Lightweight in the automotive industry with special consideration of the foam injection moulding

author:

Mr.

Wolfgang Schuler

course of studies:

industrial engineering

seminar group:

KW10wIA-F

first examiner:

Prof. Dr. rer. oec. Volker Tolkmitt

second examiner:

Prof. Dr. Dr. h. c. Hartmut Lindner

submission:

Mittweida, 30.01.2015

defence/ evaluation:

Mittweida, 2015

Bibliografische Beschreibung:

Schuler, Wolfgang:

Leichtbau in der Automobilindustrie unter besonderer Betrachtung des Schaumspritzgießens. -2015. -VIII, 64 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Wirtschaftswissenschaften,
Diplomarbeit, 2015

Referat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Schaumspritzgießen als Leichtbaumaßnahme in der Automobilindustrie. Die unterschiedlichen Schaumspritzgießverfahren sollen aufgezeigt und theoretisch erklärt werden. Anschließend werden Vor- und Nachteile der Verfahren verglichen. Die Verfahren werden mit Investitionsverfahren berechnet und untereinander, als auch mit dem Standard-Spritzgießen verglichen, um die jeweiligen Vorteile beziehungsweise Potenziale der einzelnen Verfahren erkennbar zu machen. Mit den erlangten Ergebnissen werden die Chancen und Risiken für die Automobilhersteller und die Zulieferer, bezogen auf das Schaumspritzgießen, erläutert.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Methodisches Vorgehen.....	5
2 Schaumspritzgießen	7
2.1 Spritzgießen Allgemein / Spritzgießgrundlagen	7
2.2 Schaumspritzgießen - Allgemein.....	12
2.3 Chemisches Schaumspritzgießen.....	32
2.4 Physikalisches Schaumspritzgießen	35
2.5 Vergleich der Verfahren	43
2.6 Vor- und Nachteile der Verfahren.....	45
2.7 Anwendungsbeispiele	47
3 Wirtschaftliche Betrachtung der Verfahren	50
3.1 Rentabilitätsrechnung – Return on Investment	52
3.1.1 Theorie	52
3.1.2 Berechnung der Verfahren	53
3.2 Amortisationsrechnung.....	55
3.2.1 Theorie	55
3.2.2 Berechnung der Verfahren	56
4 Chancen und Risiken.....	59
4.1 Chancen und Risiken für den Automobilhersteller	59
4.2 Chancen und Risiken für den Zulieferer.....	60
5 Fazit und Ausblick.....	62

Inhaltsverzeichnis	II
5.1 <i>Ergebnis</i>	62
5.2 <i>Ergebnisanalyse</i>	62
5.3 <i>Fazit</i>	63
5.4 <i>Ausblick</i>	64
Literaturverzeichnis	VII
Selbstständigkeitserklärung	

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Leichtbaupotenzial	3
Abb. 2 Aufbau einer Spritzgießmaschine	8
Abb. 3 Spritzgießprozess	10
Abb. 4 Schaumspritzgießen	14
Abb. 5 Druck- und Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit	16
Abb. 6 Schematische Darstellung der freien Energie	18
Abb. 7 Blasenmodell	20
Abb. 8 Zyklusreduktion.....	24
Abb. 9 Einfallstellen.....	25
Abb. 10 Gewichtseinsparung	26
Abb. 11 Charakteristische Auswirkungen des Schaumspritzgießens	29
Abb. 12 Chemische Schaumspritz-Schnecke	33
Abb. 13 Standard Schnecke	33
Abb. 14 Physikalische Schaumspritz-Schnecke	37
Abb. 15 MuCell Maschine	38
Abb. 16 Gasgegendruckverfahren	39
Abb. 17 Physikalisches Schaumspritzgießen	40
Abb. 18 Aufschäumgrad.....	41
Abb. 19 Luftfiltergehäuse PA6GF30	48

Abbildungsverzeichnis	IV
Abb. 20 PP Türinnentragstruktur chemisch geschäumt.....	49
Abb. 21 Luftfiltergehäuse Polyamid	49

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Vor- Nachteile chemisches Schaumspritzgießen	45
Tab. 2 Vor- Nachteile physikalisches Schaumspritzgießen	46
Tab. 3 Kosteneinsparungspotential - Verfahren im Vergleich	51
Tab. 4 Rentabilitätsrechnung	54
Tab. 5 Amortisationsrechnung	58

Abkürzungsverzeichnis

OEM	Original Equipment Manufacturer - Erstausrüster
TSG	Thermoplastschaumspritzgiessen
Inc.	Incorporated – Gesellschaft mit beschränkter Haftung
SCF	Supercritical fluid – Flüssigkeit im superkritischen Zustand
ADPC	Automatic Delivery-Pressure-Control - Automatische Druck-Abgabe-Kontrolle
PP	Polypropylen
PE-HD	Polyethylen – hoher dichte
PS	Polystyrol
PC	Polycarbonat
PA	Polyamid
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat

1 Einleitung

Zu Beginn dieser Arbeit wird in den folgenden Kapiteln die Problemstellung erläutert, anschließend die Zielsetzung der Arbeit definiert und als Überblick das methodische Vorgehen aufgezeigt.

1.1 Problemstellung

In der Automobilindustrie deutet sich ein Umschwung an. In der Vergangenheit wurden Autos mit immer mehr Technologie ausgestattet was sich besonders auf das Fahrzeuggewicht auswirkte. Dies muss sich nun ändern, da der Verbrauch und der CO₂-Ausstoß verringert werden müssen. Eine Nichteinhaltung der bevorstehenden, gesetzlichen Vorgaben zieht für Automobilhersteller ansonsten hohe Strafen mit sich.

Automobilhersteller müssen in Europa bis 2020 unter einen durchschnittlichen CO₂-Emmissionswert von 95 Gramm pro Kilometer kommen was bei einem Fahrzeug mit Benzinmotor einem Verbrauch von annähernd vier Litern bedeutet. Bei Überschreitung dieser Grenze drohen Automobilherstellern Strafzahlungen von bis zu 4.000 Euro pro Fahrzeug.¹

Um dieses Ziel zu erreichen haben die Hersteller die Möglichkeit kleinere Motoren, alternative Antriebe und vor allem leichtere Fahrzeuge zu entwickeln.

Die in Europa gesetzten Grenzwerte dienen nicht nur dem Klimaschutz, sondern sollen auch den Verbrauchern Kosten sparen, denn bekanntermaßen hängen der CO₂-Ausstoß und der Spritverbrauch direkt zusammen.

Folgende Richtwerte können dabei angenommen werden. Ein Liter Diesel verbrennt zu 2,64 Kilogramm CO₂, während ein Liter Benzin 2,33 Kilogramm CO₂

¹ Vgl. Rees, 2014, S.1

² Vgl. Rees, 2014, S.1

erzeugt. Mit der Grenze von 95 Gramm pro Kilometer muss somit der Verbrauch auf 100 Kilometer auf 3,6 Liter Diesel und 4,1 Liter Benzin gesenkt werden.²

Dies ist aber leichter gesagt als getan. Das Problem der Automobilhersteller ist, dass Technologien, die den Verbrauch reduzieren, gleichzeitig das Gewicht des Fahrzeugs erhöhen. Beispielsweise steigt das Fahrzeuggewicht durch eine Start-Stopp-Automatik um ca. 50 Kilogramm und durch einen Elektroantrieb sogar um 250 Kilogramm. Dabei verliert man die Verbrauchsminderung wieder durch die Gewichtserhöhung. Eine Reduzierung des Gewichts wäre aber sinnvoll, denn Gewichtsreduzierung zahlt sich aus. Als Richtwert ist anzunehmen, dass 100 Kilogramm Gewichtseinsparung den Verbrauch um ca. einen halben Liter reduzieren.³

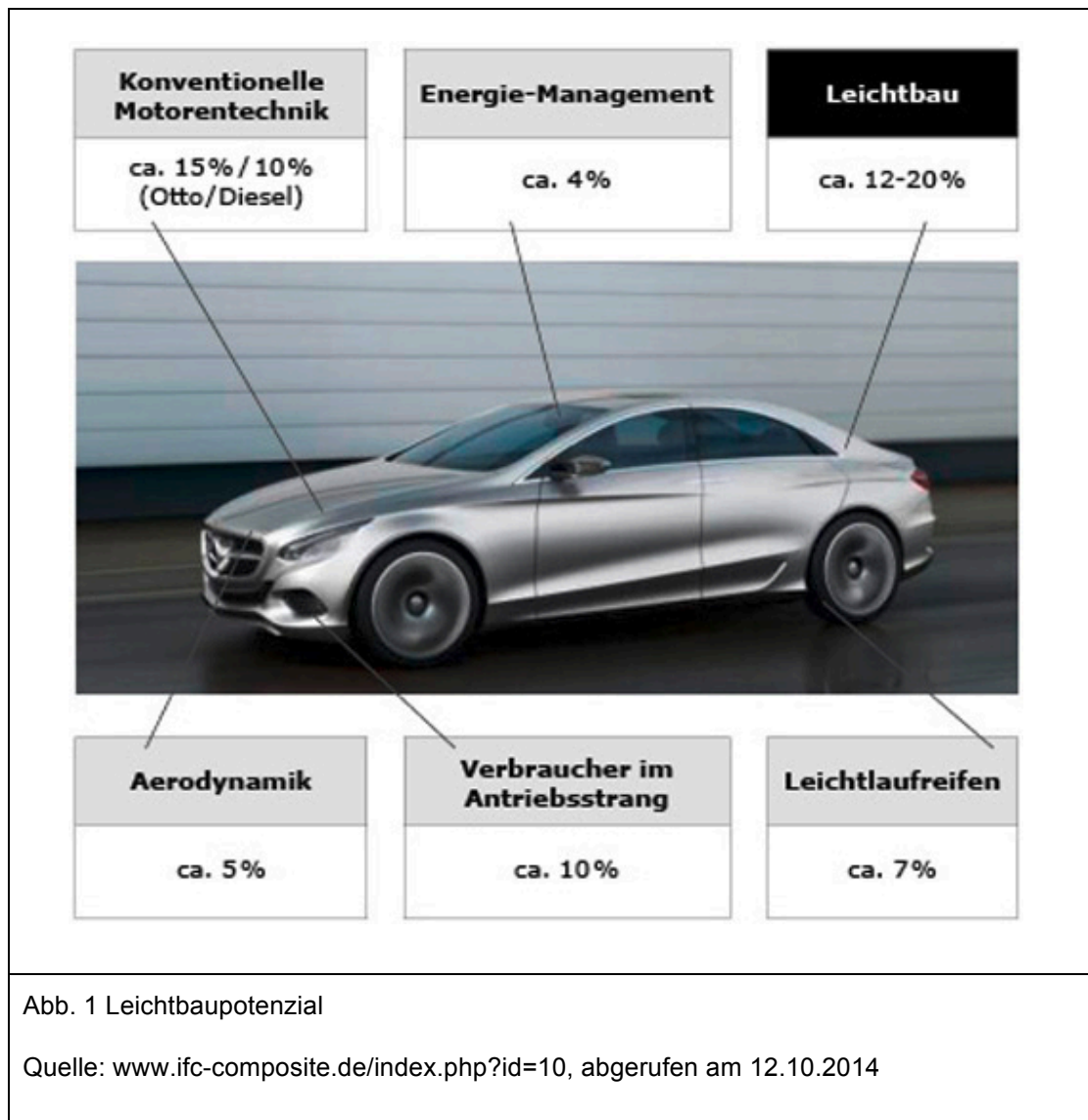
Automobilhersteller müssen daher, um am Markt wettbewerbsfähig zu bleiben, das Gewicht ihrer Fahrzeuge drastisch verringern. Hierbei ist jedes Gramm wichtig, wodurch in der Automobilindustrie ein großer Innovationsdruck auf den Herstellern lastet.

Neben den genannten Defiziten, bietet der Leichtbau aber auch Vorteile für die Automobilhersteller, wie beispielsweise eine Kostenersparnis durch Reduzierung der benötigten Rohstoffmenge sowie einfachere Handhabung und Transport von leichteren Bauteilen.⁴

² Vgl. Rees, 2014, S.1

³ Vgl. ebenda

⁴ Vgl. IFC, 2014, S.1



Der Druck, den Leichtbau flächendeckend in allen Fahrzeugen umzusetzen, wird von den Fahrzeugherstellern weitgehend an die Zulieferer weitergegeben, die sich dadurch neue Verfahren und Herstellungstechniken erarbeiten müssen, um weiterhin am Markt konkurrenzfähig zu bleiben und Aufträge von den Fahrzeugherstellern zu erhalten. Durch diese ständige Forschung und Entwicklung, ergeben sich eine Vielzahl neuer und innovativer Herstellverfahren.

Eine mögliche Technik, um bei Kunststoffspritzgussteilen Gewicht zu reduzieren, ist das Schaumspritzgießen. Durch die Komplexität und Vielfältigkeit dieses Verfahrens ist es aber schwierig ein Gefühl dafür zu bekommen, wie viel Gewicht damit einspart werden kann und mit welchen Kosten, die für Automobilhersteller

und auch deren Zulieferern in Form von steigenden Bauteilkosten und Investitionskosten anfallen, zu rechnen ist.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine mögliche Leichtbautechnologie für Kunststoffspritzgussbauteile vorzustellen, das Schaumspritzgießen. Dieses Schaumspritzgießen soll genau vorgestellt und sowohl technisch als auch wirtschaftlich durchleuchtet werden. Dadurch sollen die verschiedenen Möglichkeiten des Schaumspritzgießens verglichen werden, um aufzuzeigen welches der Verfahren für welchen Einsatzfall zu empfehlen ist.

Die Verfahren sollen auch wirtschaftlich hinsichtlich Rentabilität und Amortisationszeit analysiert werden, damit man eine Vorstellung bekommt mit welchen Kosten man bei solch einem Verfahren rechnen muss.

Im Laufe dieser Diplomarbeit sollen folgende Thesen auf deren Wahrheit überprüft werden:

- These 1: Auf Grund von höheren Investitionskosten und größerem Maschinenaufwand geht man von vornherein davon aus, dass das physikalische Schäumen wirtschaftlich dem chemischen Schäumen, auf Grund der höheren Investitionskosten, unterlegen ist.
- These 2: Das Anwenden des Leichtbauverfahrens Schaumspritzgießen geht stets mit einer Erhöhung der Bauteilkosten einher, da die Treibmittelkosten und die Materialkosten zu addieren sind.
- These 3: Das chemische Schaumspritzgießen ist hinsichtlich der Oberflächenqualität dem physikalischen Schaumspritzgießen überlegen.

1.3 Methodisches Vorgehen

Im ersten Kapitel der Einleitung soll auf die Problemstellung, die als Grundlage und Motivation für die Arbeit dient, näher eingegangen werden. Die Zielsetzung definiert die gesteckten Ziele, die mit der Diplomarbeit erreicht werden sollen, und gibt vor, welche Thesen auf deren Wahrheitsgehalt geprüft werden. Mit dem methodischen Vorgehen wird die Vorgehensweise in der Arbeit definiert werden.

Im zweiten Kapitel wird das Schaumspritzgießen genauer unter die Lupe genommen. Im ersten Unterpunkt wird die Theorie dazu behandelt. Es wird sowohl das allgemeine Spritzgießen, als auch die spezifischen Verfahren, physikalisches Schaumspritzgießen und chemisches Schaumspritzgießen behandelt. Dabei werden die Verfahrensabläufe und die individuellen Eigenschaften der Verfahren beschrieben und näher erläutert.

Auf Grundlage dieses Unterpunktes werden im nächsten Unterpunkt die Verfahren miteinander verglichen. Aufbauend auf diesen Vergleich werden anschließend im nächsten Unterpunkt Vor- und Nachteile der Verfahren betrachtet. Als letzter Unterpunkt von Kapitel zwei werden dann noch Anwendungsbeispiele der Verfahren veranschaulicht.

Im dritten Kapitel widmet man sich der wirtschaftlichen Betrachtung des chemischen und physikalischen Schaumspritzgießens. Dies geschieht mittels zweier Investitionsrechnungen, der Rentabilitätsrechnung (Return on Investment) und der Amortisationsrechnung. Beide Rechnungen sind als Unterpunkte der wirtschaftlichen Betrachtung der Verfahren deklariert und werden dann, jeweils hinsichtlich deren Theorie betrachtet.

Aufbauend auf den theoretischen Teil werden dann sowohl das chemische als auch das physikalische Schaumspritzgießen auf Grundlage von beispielhaften Annahmen mit beiden Rechenverfahren berechnet.

Im vierten Kapitel widmet man sich der Chancen und Risiken des chemischen und des physikalischen Schaumspritzgießens. Dabei werden sowohl die Chancen und Risiken für den Automobilhersteller selbst, als auch für den Zulieferer ausgewiesen, begründet und erklärt.

Im fünften und letzten Kapitel werden im Unterpunkt Ergebnis, abschließend, die vorhandenen Resultate und Erkenntnisse miteinander verglichen, um weiterführend, im nächsten Unterpunkt, der Ergebnisanalyse, die einzelnen Erkenntnisse zu erklären und zu begründen. Mit den beiden Unterpunkten Fazit und Ausblick wird die Diplomarbeit dann, durch eine kurze Zusammenfassung und aufzeigen der weiteren möglichen Entwicklung, final abgeschlossen.

2 Schaumspritzgießen

Das Schaumspritzgießen ist eine Sonderform des Spritzgießens und wird in den nächsten Abschnitten genauer in Hinblick auf dessen Wirkungsweise und unterschiedlichen Verfahren beschrieben. Als erstes wird jedoch das Standard-Spritzgießen theoretisch behandelt.

2.1 Spritzgießen Allgemein / Spritzgießgrundlagen

Das Spritzgießen auch Spritzguss genannt, bezeichnet ein Urformverfahren, das Kunststoffgranulat in einer Spritzgießmaschine verflüssigt, auch als Plastifizieren bezeichnet, und unter Druck in eine Form, dem Spritzgießwerkzeug, eingespritzt. Im Spritzgießwerkzeug kühlt der Werkstoff ab und gelangt durch eine Vernetzungsreaktion wieder in den gefestigten Zustand zurück. Die Bauteilform ist dabei von der Kavität, dem Hohlraum im Werkzeug, abhängig.⁵

Im Allgemeinen werden Spritzgießmaschinen in die Düsenseite und die Auswerferseite unterteilt. Erstere kann auch als Plastifiziereinheit oder Spritzeinheit bezeichnet werden, da in diesem Bereich der Maschine der Kunststoff plastifiziert wird. Durch die Positionierung des Schließmechanismus auf der Auswerferseite kann diese auch Schließereinheit genannt werden. Im weiteren Verlauf werden die Begriffe Düsenseite und Auswerferseite verwendet werden.⁶

⁵ Vgl. Jaroscheck, 2013, S.1

⁶ Vgl. Jaroscheck, 2013, S.12 f.

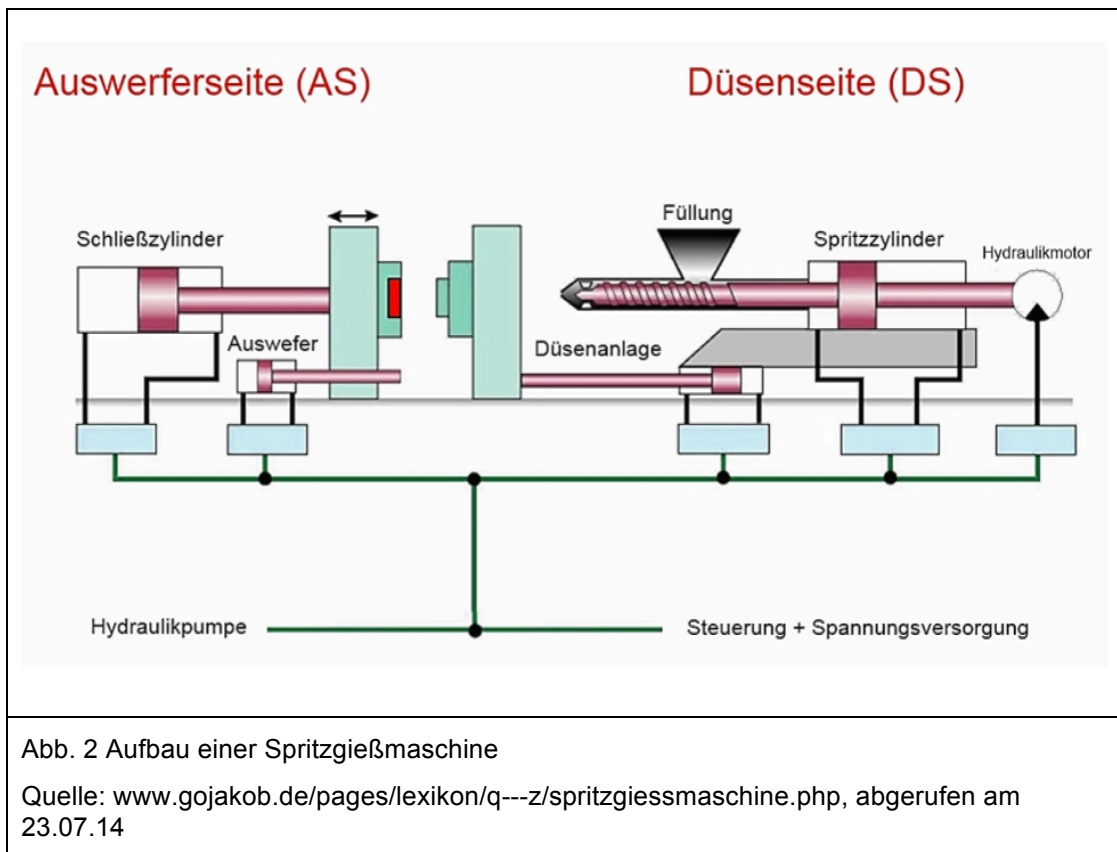


Abb. 2 Aufbau einer Spritzgießmaschine

Quelle: www.gojakob.de/pages/lexikon/q---z/spritzgiessmaschine.php, abgerufen am 23.07.14

Die Düsenseite besteht aus dem Spritzzylinder, der waagrecht angeordnet ist und in dem die sich drehende Schnecke das Kunststoffgranulat plastifiziert. Die Schneckenform ist abhängig von dem zu verarbeitenden Werkstoff und ist speziell für diesen ausgelegt, wodurch die Schnecke für unterschiedliche Werkstoffe ausgetauscht werden muss. Die Schnecke kann in axialer Richtung bewegt werden. Auf dem Spritzzylinder ist ein Fülltrichter angebracht, in den das Kunststoffgranulat - also das Rohmaterial - eingefüllt wird. Am Ende des Spritzzylinders befindet sich eine verschließbare Düse, die den Kunststoffe Austritt reguliert. Im Betrieb wird die Düse an die düsenseitige Werkzeughälfte angedrückt, die sich auf einer Aufspannplatte befindet. Diese Werkzeughälfte zählt jedoch zur Auswerferseite und kann in deren Position nicht bewegt werden. Die Düsenseite führt die Bewegungen der Schnecke standardmäßig mittels eines Hydraulikantriebs aus.⁷

⁷ Vgl. Stitz / Keller, 2004, S.20

Die Auswerferseite besteht aus der zweiten Werkzeughälfte, die ebenfalls auf einer Aufspannplatte angebracht ist, welche jedoch beweglich ist und durch die Schließeinheit mit der düsenseitigen Werkzeughälfte geschlossen wird. Heutzutage sind hydraulische Schließeinheiten Standard, es gibt aber auch elektromechanische, die mit Hilfe von Elektromotoren und Hebeln arbeiten. Die Schließeinheit führt nicht nur die Bewegungen der linken Werkzeughälfte aus, sondern bringt bei dem geschlossenen Werkzeug auch die beim Spritzvorgang notwendige Zuhaltkraft auf, damit sich die Werkzeughälften während dem Einspritzen nicht auseinanderdrücken. Ebenfalls noch auf der Auswerferseite befindet sich das Auswerferpaket, auf dem sich wie der Name schon sagt die Auswerfer befinden. Das Auswerferpaket wird ebenfalls hydraulisch angesteuert und bewirkt durch das Bewegen der Auswerfer im Werkzeug ein Auswerfen des fertigen Spritzgussteils aus der Negativform.⁸

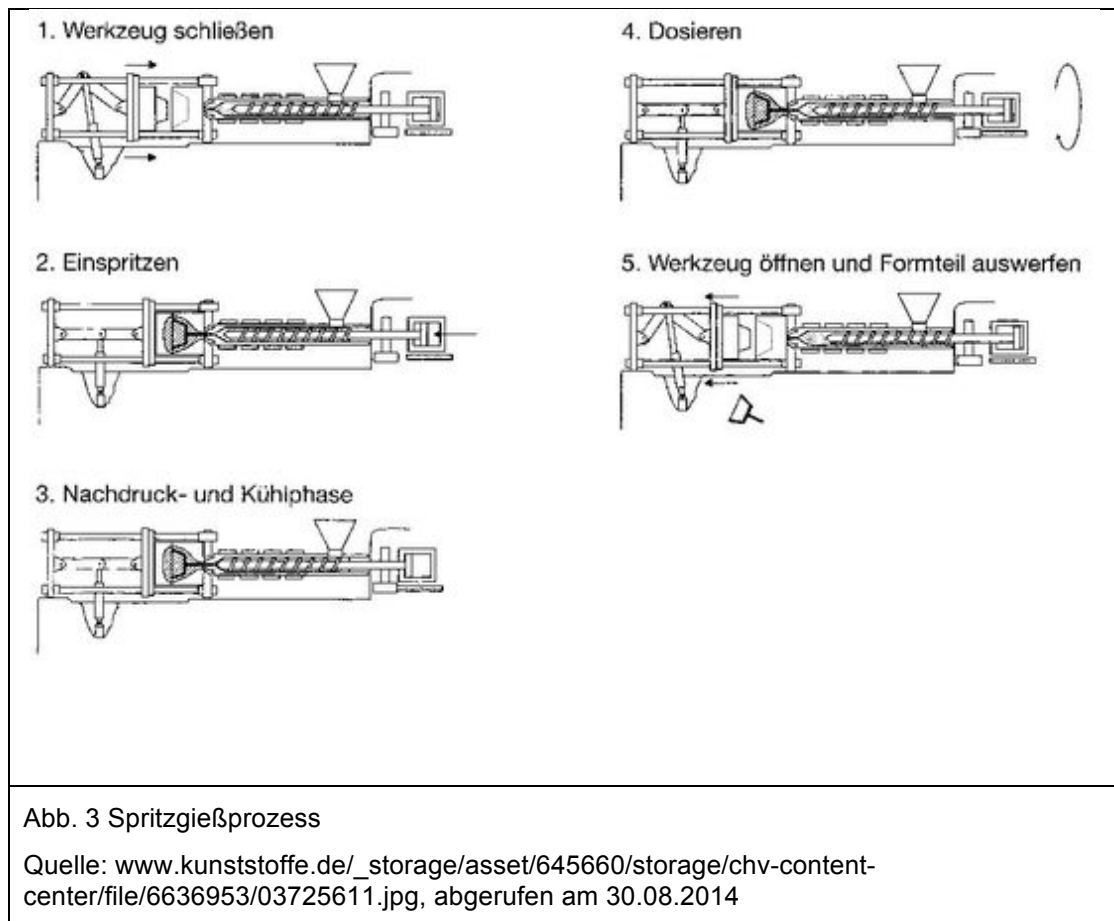
Auswerfer- und Düsenseite müssen entsprechend dem Werkstoff, Spritzgießbauteil und Prozess temperiert werden. Da die beiden Seiten im Normalfall gegensätzliche Temperaturen aufweisen, können sie voneinander wegbewegt werden und dadurch thermisch abgetrennt werden. Als Ausnahme gelten hierfür Heißkanalsysteme.⁹

⁸ Vgl. Stitz / Keller, 2004, S.20

⁹ Vgl. ebenda

Spritzgießprozess:

Ein Standardspritzgussprozess setzt sich in der Regel aus folgenden Schritten zusammen:



Im ersten Schritt werden die beiden Werkzeughälften geschlossen, während das Kunststoffgranulat plastifiziert wird. Beim Plastifizieren wird das Kunststoffgranulat vom Trichter in den Spritzzylinder befördert. Durch die drehende Schnecke bewegt sich das Kunststoffgranulat vorbei an der beheizten Zylinderwand nach vorne zur Schneckenspitze und wird durch die geschlossene Düse zurückgehalten.¹⁰

¹⁰ Vgl. Guido, 2014, S.1

Die Schnecke fährt dabei axial nach hinten und sobald sich genug plastifizierter Kunststoff, auch Schmelze genannt, angesammelt hat, kann der Einspritzvorgang beginnen. Hierfür bewegt sich die Schnecke axial nach vorne und erzeugt dadurch den hohen Einspritzdruck der je nach Größe der Maschine, bis über 1000 bar erreichen kann. Der Einspritzdruck ist je nach Kunststoff und Spritzteil unterschiedlich einzustellen.¹¹

Ist der nötige Druck aufgebaut, kann im zweiten Schritt die Düse geöffnet werden, so dass die Schmelze mit dem Einspritzdruck in die Werkzeugkavität eingespritzt wird. Als Werkzeugkavität bezeichnet man den Hohlraum, der als Negativform des zu erstellenden Spritzteils im Werkzeug eingebracht ist. Sobald die Schmelze in der Kavität eingespritzt ist, beginnt sie abzukühlen.¹²

Durch die Kristallisation der Kunststoffschmelze beginnt das Spritzteil zu schrumpfen. Die Schrumpfung eines Spritzteils macht sich durch geringeres Volumen gegenüber der Kavität bemerkbar. Dadurch muss man bei der Werkzeugauslegung/-erstellung diese Schrumpfung einberechnen und die Kavität um diesen Wert größer ausführen um die gewünschten Maße zu erhalten. Die theoretischen Schrumpfungswerte können aus den Materialdatenblättern der Rohstoffhersteller abgelesen werden. Zu hundert Prozent können diese Schrumpfungswerte jedoch leider nicht übernommen werden, da die Schrumpfung zu sehr von unterschiedlichen Einflüssen abhängt und dadurch je nach Spritzteil, Werkzeugauslegung, Kühlung und Spritzgießparametern unterschiedlich ist. Computerunterstützte Simulationen können bei der Auslegung des Werkzeugs behilflich sein und dadurch auch den von der Schrumpfung abhängigen Verzug minimieren. Unter Verzug ist die Formabweichung zu verstehen, die durch die Schrumpfung entstehen kann.¹³

¹¹ Vgl. Guido, 2014, S.1

¹² Vgl. ebenda

¹³ Vgl. ebenda

Um während des Spritzprozesses die Schwindung und den Verzug möglichst gering zu halten, verwendet man im dritten Schritt den so genannten Nachdruck, um während des Abkühlprozesses noch einmal Schmelze nachzudrücken.

Während danach das Spritzteil weiter abkühlt, beginnt die Schnecke im nächsten Schritt wieder mit dem Plastifizierungsvorgang um für den nächsten Spritzvorgang wieder genügend Schmelze zu produzieren. Das Abkühlen ist ein wichtiger Vorgang, um die notwendige Härte des Spritzteils herzustellen, so dass dieses beim auswerfen nicht beschädigt wird.

Ist das Spritzteil auf die notwendige Temperatur herunter gekühlt, wird im fünften Schritt das Werkzeug geöffnet und das Spritzteil mit Hilfe der Auswerfer aus der Kavität ausgeworfen.

Anschließend beginnt der Kreislauf von vorn. Der größte Einflussfaktor für die Dauer eines Spritzgussvorgangs ist die Abkühlzeit, da dies am meisten Zeit benötigt.¹⁴

2.2 Schaumspritzgießen - Allgemein

Geschichtlich gesehen hat das Schaumspritzgießen seinen Ursprung in den 1950er Jahren. Damals wurde in den ersten Versuchen mit Backpulver als Zusatz im Granulat experimentiert, um Einfallstellen zu verhindern. Nach der Entwicklung neuer Treibmittel wurde das Hauptaugenmerk auf die Gewichtseinsparung gelegt. In den 1970er Jahren kam es zu den ersten Serienanwendungen des Schaumspritzgießens mit chemischen Treibmitteln. In den 1980er Jahren wurde das physikalische Schaumspritzgießverfahren im Massachusetts Institute of Technology erfunden und rund 10 Jahre später gelang mit dem MuCell Verfahren der erste Durchbruch. Jedoch als erstes nur für Extrusion und erst Anfang 2000

¹⁴ Vgl. Guido, 2014, S.1

für das Spritzgießen. In den folgenden Jahren wurde das Verfahren immer weiter verbessert, um den maximalen Benefit zu erlangen.¹⁵

Der Schaumspritzgießprozess lässt sich allgemein in folgende Prozessschritte unterteilen:

- Bildung einer homogenen Mischung aus Polymerschmelze und Treibgas
- Nukleierung
- Schaumwachstum
- Stabilisierung der Schaumzellen.¹⁶

Der Schaumspritzgießvorgang wird nun grob beschrieben und anschließend genauer auf die Prozessschritte eingegangen.

Die Plastifizierung ist auch beim Schaumspritzgießen der erste Schritt. Es entsteht ein Polymer-Gas-Gemisch durch Hinzumischen von Treibfluid (physikalisches Schaumspritzgießen) oder das Zersetzen eines chemischen Treibmittels (chemisches Schaumspritzgießen). Es ist hierbei sehr wichtig, dass diese Mischung einphasig ist, um eine homogene Schaumstruktur zu erreichen, welche von einer molekularen Verteilung des Treibfluids/Treibmittels abhängig ist.¹⁷

Die Mischung sammelt sich nun am Ende der Plastifiziereinheit an und während dem Einströmen in die Kavität kommt es zu einem Druckabfall im Inneren der Polymer-Gas-Mischung. Anschließend bilden sich Keime durch das Übersättigen der Schmelze an gelöstem Treibgas. Diese Keime wachsen im weiteren Verlauf zu kleinen Gasblasen. Das Wachstum hält bis zur Abkühlung der Schmelze im Werkzeug an. Während dem Abkühlprozess stellt sich ein Kräftegleichgewicht zwischen den Zellwänden und dem Gasdruck in den Zellen ein. Nach diesem

¹⁵ Vgl. Handschke, 2012, S.151 f.

¹⁶ Vgl. Altstätter, 2010, S.15

¹⁷ Vgl. ebenda

Vorgang kann das Formteil ganz normal entformt werden und der Zyklus beginnt erneut.¹⁸ Die Vorgänge werden nachstehend in Abb. 4 veranschaulicht:

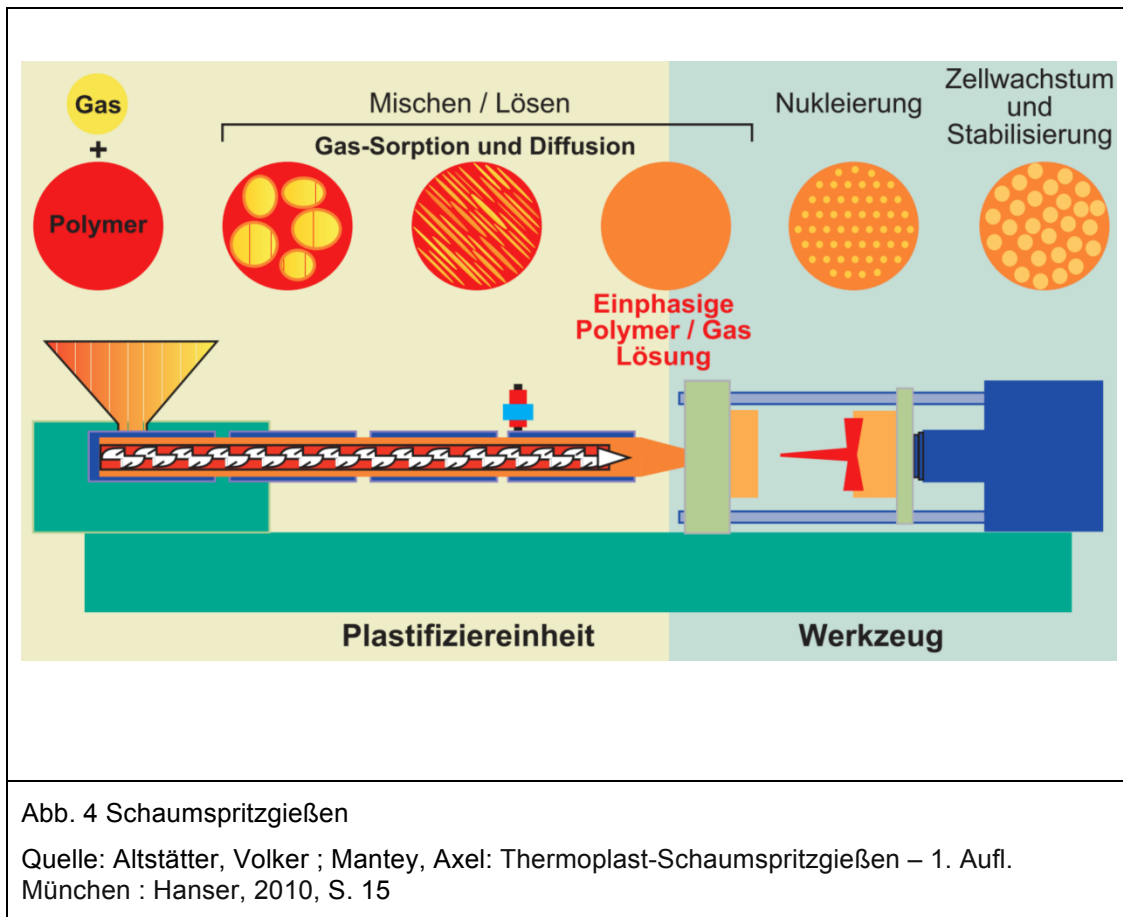


Abb. 4 Schaumspritzgießen

Quelle: Altstätter, Volker ; Mantey, Axel: Thermoplast-Schaumspritzgießen – 1. Aufl.
München : Hanser, 2010, S. 15

Einphasige Polymer-Gas-Lösung:

Das Thermoplastschaumspritzgießen ist erheblich von Stofftransportvorgängen abhängig. Durch die Absorption der Fluidmoleküle an der Oberfläche beginnen die Stofftransportvorgänge in einer Polymerschmelze.¹⁹

Die Absorption ist der Zusammenschluss des Fluids mit dem Polymer. Im Polymer ist das Fluid, abhängig von der Art, besser oder schlechter löslich. Das maximale Aufnahmevermögen, auch als Löslichkeit des Fluids bezeichnet, wird durch die

¹⁸ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S.15 f.

¹⁹ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 16

Sorption beschrieben, während die Diffusion die Transportvorgänge des Fluids in der Polymerschmelze beschreibt, welche auf Partialdruckgefälle und Konzentrationsdruckgefälle beruht.²⁰

Die Ausgleichsgeschwindigkeit des Konzentrationsunterschieds, der während dem Einmischvorgang des Fluides in das Polymer entsteht, ist abhängig von der Temperatur, der Polymerart, dem Polymeraufbau, der Fluidart und dem Fluidaufbau.²¹

Die Diffusionsgeschwindigkeit ist von der Konzentration des gelösten Gases beeinflusst. Der Diffusionskoeffizient und die Diffusionsgeschwindigkeit steigen mit zunehmender Temperatur. Wird die Sättigungsgrenze des Polymers annähernd erreicht, verringert sich aufgrund des sinkenden örtlichen Konzentrationsunterschieds die Diffusionsgeschwindigkeit.²²

Die Gaskonzentration ist im Polymer direkt proportional zum Druck. Bei hohem Druck und hoher Konzentration ist der Löslichkeitskoeffizient eine Funktion von Temperatur und Druck.²³

Schematisch kann die Druck- und Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit eines Gases in der Polymerschmelze folgendermaßen dargestellt werden:

²⁰ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 16

²¹ Vgl. ebenda

²² Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 17

²³ Vgl. ebenda

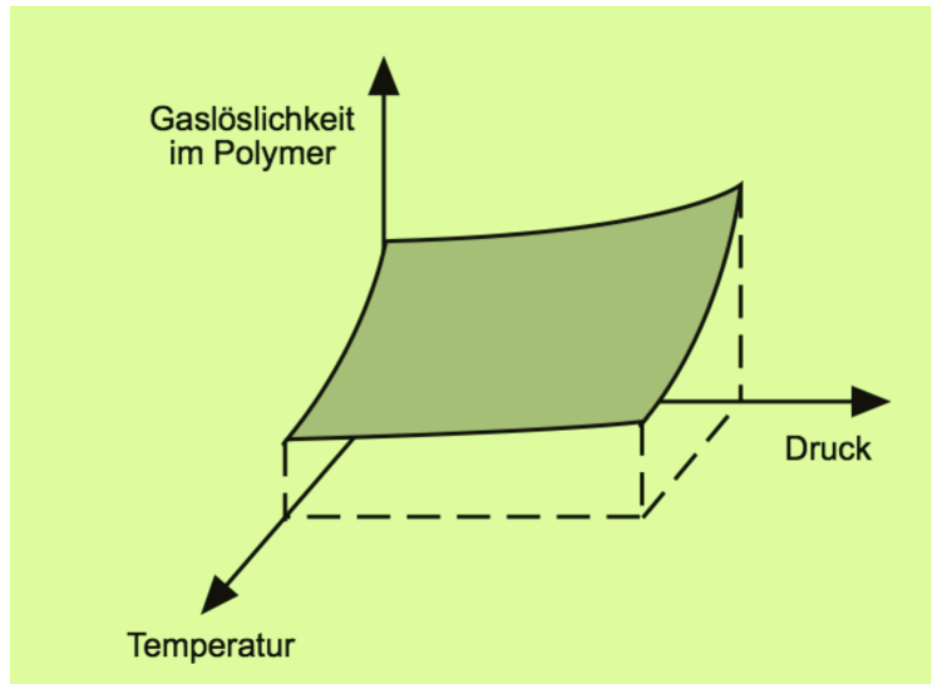


Abb. 5 Druck- und Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit

Quelle: Altstätter, Volker ; Mantey, Axel: Thermoplast-Schaumspritzgießen – 1. Aufl. München : Hanser, 2010, S. 18

Durch diese Grafik wird ersichtlich, dass mit steigendem Druck die Löslichkeit zunimmt und durch Erhöhung der Temperatur abnimmt.

Durch die Auflösung des Gases in der Schmelze wird die Viskosität deutlich verringert. Durch die Ablagerung der Gasmoleküle in den Polymermolekülketten steigert sich die Beweglichkeit der einzelnen Makromolekülsegmente wodurch sich die Viskosität reduziert.²⁴

Die Effekte erweisen sich in den Prozessen als besonders nützlich. Mit der Gaszugabe wird die Viskosität der Polymerschmelze so verringert, wie wenn die Temperatur der Schmelze ohne Gaszugabe um eine bestimmte Temperatur (ΔT) erhöht wurde. Die Glasübergangstemperatur des Polymers senkt sich dadurch im Verarbeitungsprozess um ΔT . Durch die hohe Dynamik des Schaumspritzgießens

²⁴ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 17

ist es oft nicht möglich, die Verarbeitungstemperatur bedeutsam abzusenken, wodurch es oft vorkommt, dass die Verarbeitungstemperatur nur gering reduziert wird, um eine Kompromisslösung zwischen der verschlechterten Gasdiffusionsgeschwindigkeit und dem Vorteil der geringeren Schmelzetemperatur zu finden.²⁵

Nukleierung:

Als Nukleierung wird das Erzeugen von Keimen, aus welchen im weiteren Verlauf Schaumzellen entstehen, bezeichnet. Die Nukleierung kann in homogen und heterogen unterteilt werden.²⁶

Homogene Nukleierung:

Hierbei werden Keime durch thermodynamische Destabilisierung der Polymer-Gas-Mischung erzeugt. Beim Schaumspritzgießen erfolgt dies üblicherweise durch Druckabfall. Der Druckabfall führt dabei zu einer Übersättigung von gelöstem Gas so dass die Keimbildung anschließend durch die Desorption des Gases erfolgt. Die dadurch erzeugten metastabilen Keime stellen eine neue Phase dar. Unter der Voraussetzung, dass für eine homogene Nukleierung ein System ohne Verunreinigung benötigt wird, wird es in Realität keine ausschließliche homogene Nukleierung geben, sondern nur Überlagerungen von homogenen und heterogenen Nukleierungen.²⁷

²⁵ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 18

²⁶ Vgl. ebenda

²⁷ Vgl. ebenda

Heterogene Nukleierung:

Die Keimbildung erfolgt an der Grenzfläche zu einer zweiten Phase. Beispiel dafür sind:

- Partikel (Talkum, Titandioxid usw.) von gezielt zu dosierten Nukleierungsmitteln,
- Zersetzungsrückstände chemischer Treibmittel,
- Verunreinigungen in flüssiger oder fester Form oder
- Oberflächen der Verarbeitungsmaschine oder des Spritzgießwerkzeugs.²⁸

Für die Keimbildung ist die Zunahme der freien Energie notwendig. Die Keimbildung wird dann durch hohen Druck in der Schaumzelle und geringer Oberflächenspannung in der Schmelze angeregt.²⁹

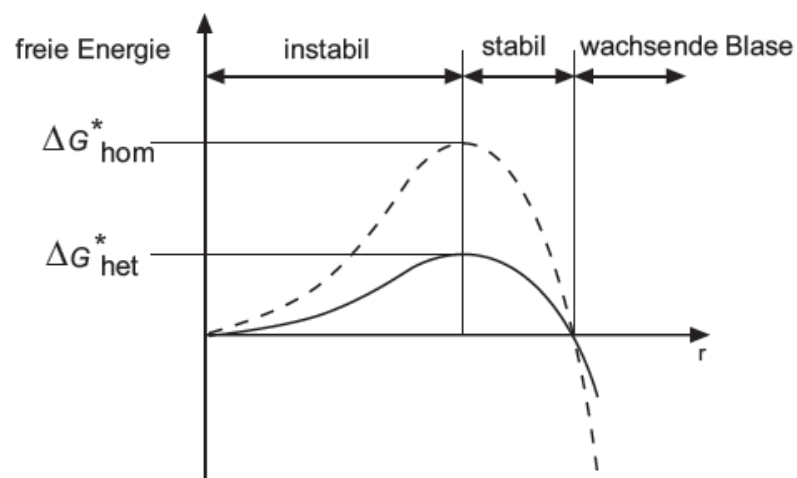


Abb. 6 Schematische Darstellung der freien Energie

Quelle: Altstätter, Volker ; Mantey, Axel: Thermoplast-Schaumspritzgießen – 1. Aufl. München : Hanser, 2010, S. 20

²⁸ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 18 f.

²⁹ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 19

Die Abb. 6 zeigt die unterschiedlichen Niveaus der freien Energie einer homogenen und heterogenen Nukleierung. Deutlich erkennbar ist bei der heterogenen Nukleierung ein Absinken der Aktivierungsenergie durch die Anwesenheit von Keimbildnern. Aus energetischer Sicht ist die heterogene Nukleierung daher günstiger als die homogene und aus diesem Grund findet die heterogene Keimbildung vor der homogenen Keimbildung statt.³⁰

Die Nukleierungsrate hängt bei der heterogenen Nukleierung allerdings von der Anzahl der vorhandenen Grenzflächen ab. Bei einer zu geringen Menge von Nukleierungsmitteln bilden sich Schaumstrukturen mit geringen uneinheitlichen Zellen. Eine hohe Konzentration von Nukleierungsmitteln birgt jedoch die Gefahr der Agglomeration von Nukleierungspartikeln, wodurch deren Wirksamkeit drastisch gesenkt wird. Der Einfluss der Partikelgröße darf dabei aber nicht außer Acht gelassen werden. Bei der gleichen Menge an Nukleierungsmitteln erzeugen feinere Partikel offensichtlich höhere Nukleierungsdichten, was durch die sich ergebende größere Oberfläche zu erklären ist.³¹

Eine hohe Nukleierungsrate ist von einem großen Druckgradienten abhängig, was bedeutet, dass ein größerer Druckabfall eine höhere Nukleierungsrate mit sich bringt. Bei Thermoplastschaumspritzgießverfahren erhält man solch hohe Druckabfallraten durch einen hohen Staudruck in Kombination mit einer schnellen Einspritzgeschwindigkeit.³²

Blasenwachstum:

Das Blasenwachstum ist ein sehr komplexer Prozess, daher verhilft man sich mit vereinfachenden Annahmen, um den Prozess anhand von Modellvorstellungen darstellen zu können. Für die Beschreibung der grundlegenden Zusammenhänge, wie sie auch beim Schaumspritzgießen stattfinden, ist das klassische Blasenmodell am besten geeignet. Eine Zelle, umgeben von einer einphasigen

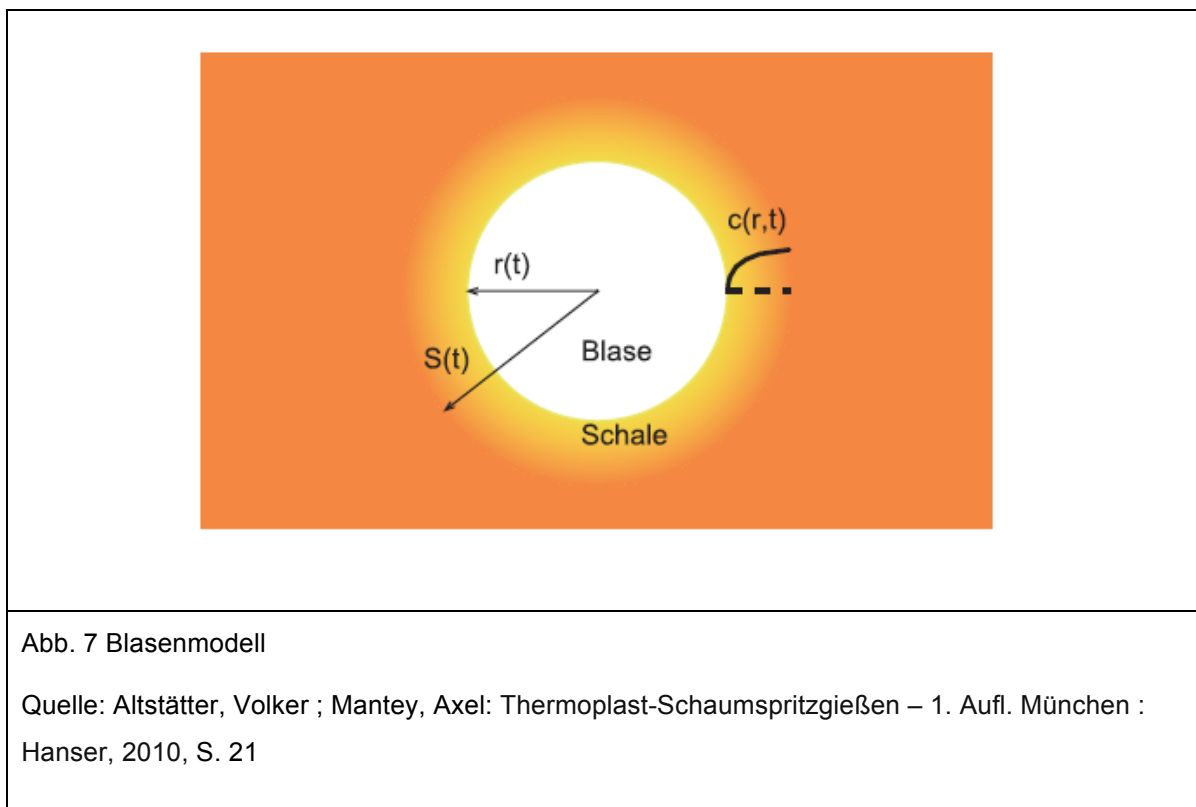
³⁰ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 20

³¹ Vgl. ebenda

³² Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 21

Polymer-Gas-Mischung ist repräsentativ für ein gleichzeitiges Blasenwachstum aller Blasen (Abb. 7). Die Gaskonzentration ist am Beginn überall in der Schmelze c_0 . Die Gaskonzentration in der Schmelze ist am Zellenrand gleich null. Die Zelle ist umgeben von einer Schale, in welcher eine endliche Menge an Treibgas vorhanden ist. Das gelöste Gas diffundiert in die Schaumzellen, wodurch es zu wachsen beginnt. Der maximale Aufschäumgrad -und somit das Wachstum- ist durch die Menge des gelösten Gases beschränkt. Durch das mit der Zeit in alle Zellen diffundierende Gas sinkt die Gaskonzentration in der kompletten Schmelze auf null.³³

Bis sich zwischen der Energie, die zum Vergrößern der Blasenoberfläche aufgebracht werden muss, und der Volumenarbeit in der Blase ein Gleichgewicht einstellt, wächst die Schaumblase weiter und weiter.³⁴



Wenn die Oberflächenspannung konstant ist, ist bei kleinen Schaumzellen ein

³³ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S.21

³⁴ Vgl. ebenda

höherer Innendruck vorhanden als in großen. Während dem Schäumprozess ist es so gut wie sicher, dass unterschiedliche Blasengrößen miteinander in Kontakt kommen, wodurch das Gas von kleinen Blasen in große Blasen diffundiert und somit größere Blasen entstehen. Dies ist jedoch beim Schaumspritzgießen nicht erwünscht, weil man dadurch grobzellige, inhomogene Schaumstrukturen erhält.³⁵

Hierbei spielt die Schmelzeviskosität eine tragende Rolle. Das Stoke'sche Gesetz beschreibt die Diffusionsgeschwindigkeit des Gases in einer vorhandenen Blase folgendermaßen:³⁶

$$w = \frac{g \cdot (2r)^2}{18\eta} \Delta\rho$$

w = Diffusionsgeschwindigkeit

g = Erdbeschleunigung

r = Blasenradius

η = dynamischen Viskosität

$\Delta\rho$ = Dichte

Laut der Gleichung erhöht sich die Diffusionsgeschwindigkeit mit sinkender Viskosität und mit zunehmendem Durchmesser der Blase.³⁷

Die Viskosität erhöht sich durch abnehmenden Gasinhalt, jedoch füllt sich die Kavität beim Schaumspritzgießen so schnell, dass dieser Effekt keine tragende Rolle einnimmt.³⁸

³⁵ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S.22

³⁶ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S.22

³⁷ Vgl. ebenda

³⁸ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S.22 f.

Stabilisierung:

Um die Schaumstruktur möglichst homogen und fein zu behalten, muss die wachsende Schaumzelle rechtzeitig stabilisiert werden. Dabei überlagern sich stabilisierende und destabilisierende Effekte folgendermaßen:

Stabilisierende Effekte:

- Abkühlung der Schmelze erhöht die Viskosität
- Ausdiffundierendes Treibgas erhöht Schmelzeviskosität
- Zunehmende Dehnung der Zellwände durch Zellwachstum führt zu Erhöhung der Dehnviskosität durch Verringerung der Stegdicke und zu einer Orientierung der Moleküle³⁹

Destabilisierende Effekte:

- Inhomogenitäten der Polymerschmelze können das Reißen der Zellwände bewirken
- Hohlräumbildung durch schnelle Dehnung⁴⁰

Die Schaumstabilisierung ist beim Schaumspritzgießen maßlich von der Temperierung des Spritzgießwerkzeugs und der Formteilmwandstärke beeinflusst. Bei geringen Wandstärken in Kombination mit einem verhältnismäßig kalten Werkzeug, kommt es zu einer schnellen Fixierung des aufgehenden Schaums. Dadurch kommt es zu einer dicken, kompakten Deckschicht, wodurch jedoch die maximal zu erhaltende Dichtereduktion sehr eingeschränkt ist, da nur ein kleiner Anteil des Bauteilquerschnitts aufschäumt. Bei dicken Wandstärken oder verhältnismäßig hohen Werkzeugtemperaturen kommt es dazu, dass der Polymerkern des Formteils länger im geschmolzenen Zustand verharrt. Diffusionsvorgänge und Zellkoaleszenz werden begünstigt, wodurch große

³⁹ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S.23

⁴⁰ Vgl. ebenda

Schaumzellen und inhomogene Schaumstrukturen entstehen können.⁴¹

Zusammenfassend kann beim Schaumspritzgießen gesagt werden, dass geringe Wandstärken und große Temperaturdifferenzen zwischen Werkzeugtemperatur und Schmelze durch frühzeitiges Einfrieren eine Bildung von homogenen, mikrozellularen Schaumstrukturen begünstigen.

Kunststoffe können mit Hilfe von chemischen und physikalischen Treibmitteln geschäumt werden. Es gibt auch Fälle, bei denen beide Varianten kombiniert werden können.

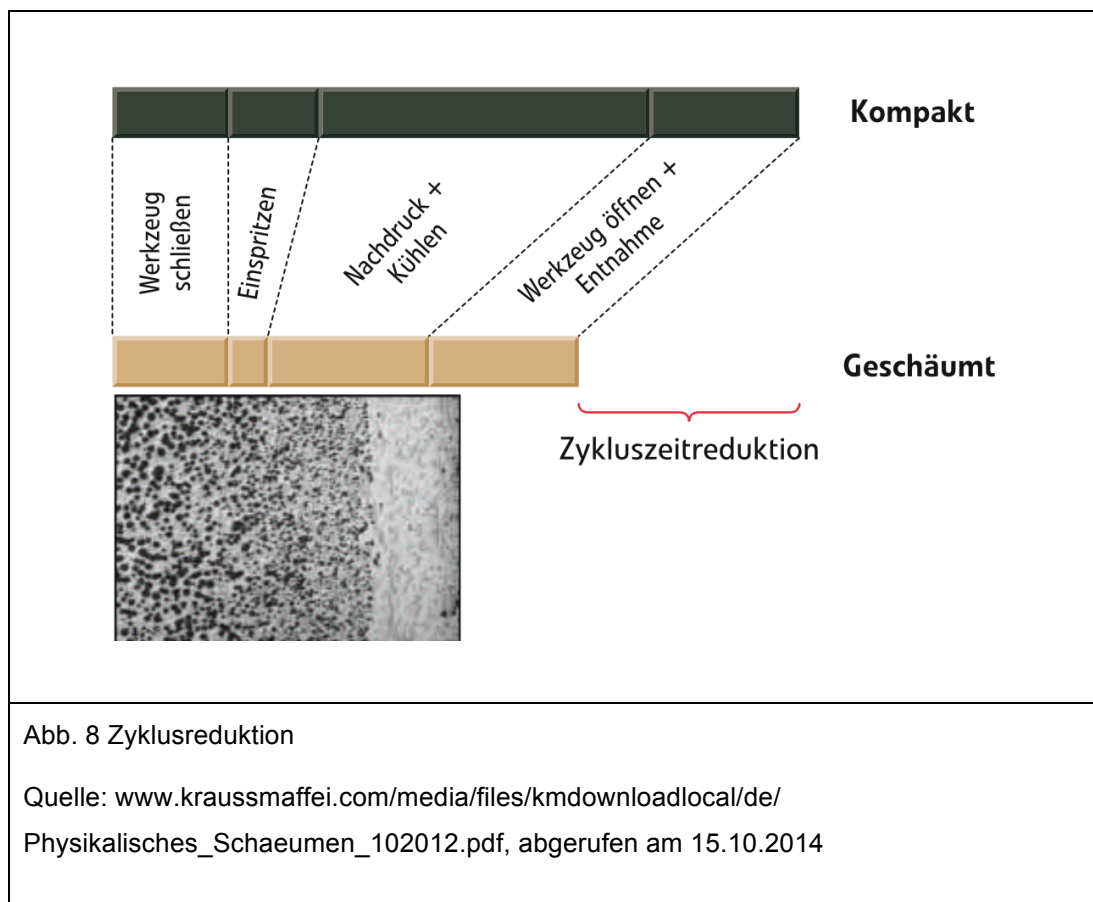
Beide Verfahren weisen Vorteile im Hinblick auf die Kunststoffschmelze beziehungsweise die fertigen Kunststoffbauteile auf:

- Kürzere Zykluszeiten
- Höhere Dimensionsstabilität und dadurch weniger Verzug
- Weniger Gewicht und weniger Material
- Wenig bis kein Nachdruck notwendig
- Reduzierte Schließkraft
- Wanddickensprünge realisierbar ohne Einfallstellen
- Bessere Maßhaltigkeit der Teile
- Längere Fließwege realisierbar
- Erhöhung der Biegespannung
- Wenig bis keine Einfallstellen

Die kürzeren Zykluszeiten ergeben sich durch die niedrigere Viskosität, die geschäumte Materialien haben. Dadurch kann einerseits schneller eingespritzt

⁴¹ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S.24

werden und andererseits niedrigere Werkzeug- und Massetemperaturen verwendet werden. Durch diese niedrigeren Temperaturen kann auch die Kühlzeit reduziert werden. Ebenso der Nachdruck und somit die Nachdruckzeit können signifikant verringert werden, weil sich der Nachdruck durch die Gasentladung der Schmelze selbst erzeugt. In einzelnen Fällen kann der Nachdruck auch komplett entfallen. All diese Merkmale führen zu einer Reduktion der Zykluszeit um bis zu 40 Prozent. Die Verringerung der Zykluszeit wird in Abb. 8 dargestellt.⁴² Man erkennt, dass die meiste Zeit bei der Kühlung und beim Nachdruck eingespart werden kann.



Die höhere Dimensionsstabilität und der geringere Verzug sind das Ergebnis des gleichmäßigen Nachdrucks, der durch das Schäumen erzeugt wird. Es entstehen

⁴² Vgl. Kraus, 2014, S. 7

spannungsarme, verzugsfreie, maßhaltige Bauteile mit minimierten Einfallstellen.⁴³

Abb. 8 zeigt den Unterschied eines Bauteils zwischen Standard-Spritzguss (links) und Schaumspritzguss mit verringerten Einfallstellen (rechts).



Abb. 9 Einfallstellen

Quelle: www.pollmann.at/fileadmin/downloads/fertigung/de/1107_Schaeumen.pdf, S.14, abgerufen am 25.12.2014

Durch den geringeren Nachdruck und die niedrige Viskosität benötigt man, eine um 30 % bis 50 % verringerte Schließkraft, was dazu führt, dass man mit kleineren, günstigeren Spritzgussmaschinen arbeiten kann. Durch das Aufschäumen des Kunststoffes benötigt man zudem weniger Material und erhält ein geringeres Bauteilgewicht, was das Verfahren für den Leichtbau prädestiniert.⁴⁴

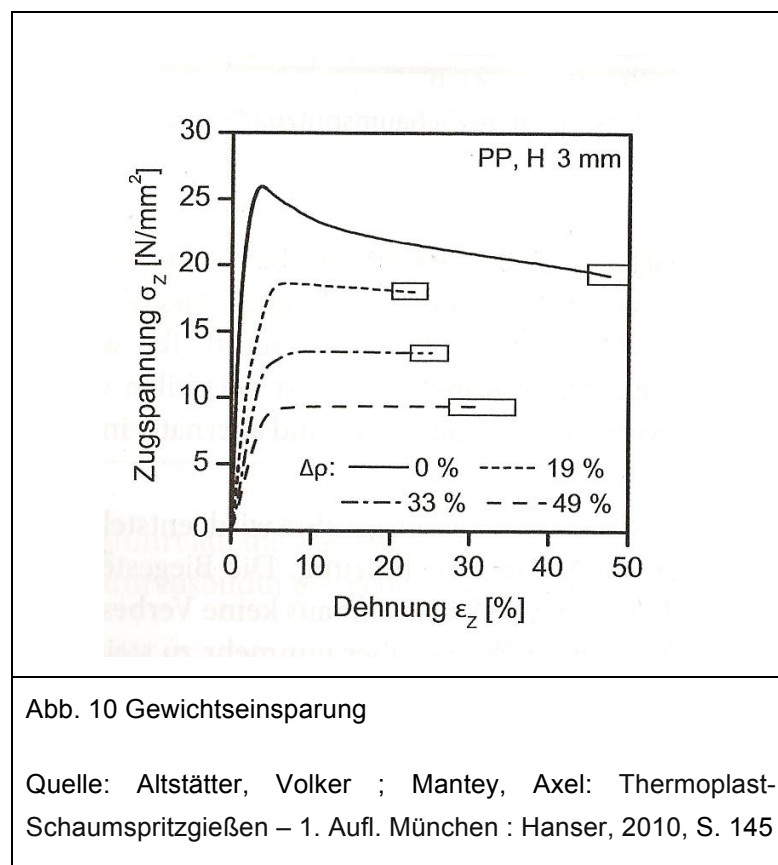
„In vielen Fällen kommen die genannten Vorteile erst durch spezielle Anlagentechnik, optimierte Prozesse und vor allem durch ein angepasstes

⁴³ Vgl. Kraus, 2014, S. 7

⁴⁴ Vgl. Kraus, 2014, S. 7

Werkzeugdesign zur Geltung. Größere Wandstärken bieten beispielsweise bei flächigen Bauteilen unter Biegebelastungen große Vorteile, da die kompakten Randschichten der Integralschaumstruktur weiter von der neutralen Faser entfernt sind und damit geometriebedingt zu höheren Biegesteifigkeiten führen“⁴⁵

Bezüglich der mechanischen Eigenschaften von schaumspritzgegossenen Bauteilen kann man allgemein sagen, dass sie sich verglichen mit kompakten, ansonsten aber gleichen Werkstoffen deutlich verändert zeigen. Der E-Modul und die Zugfestigkeit nehmen in der Regel durch das Schaumspritzgießen ab. Dieser Effekt zeigt sich um so mehr je höher die erzielte Gewichtseinsparung ist. Abb. 10 zeigt dies als Beispiel anhand der Zugspannung.⁴⁶



Oftmals ist durch das Schäumen aber sogar eine Verbesserung des mechanischen Bauteilverhaltens möglich, wenn beispielsweise flächige Produkte

⁴⁵ Roch, 2014, S. 2

⁴⁶ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S.145

überwiegend auf Biegung beansprucht werden. Für nutzbare Angaben der mechanischen Eigenschaftenänderung auf Grund des Schäumens muss immer festgelegt sein, welche Proben miteinander verglichen werden. Gegenübergestellt werden können Proben mit gleichen Wandstärken (Querschnitt, Volumen), gleicher Biegefestigkeit (Leistungsvermögen) oder mit gleichem Bauteilgewicht.⁴⁷

Die Biegesteifigkeit zeigt sich, wie beschrieben, durch das Schäumen verbessert. Dazu kann ein einfaches Beispiel aufgezeigt werden:

Annahme:

- Rechteckiger Querschnitt
- Ausgangswanddicke (h): 4 Millimeter
- Abnahme der Dichte ($\Delta\rho$) um 30 %

$$\Delta\rho = 30\%$$

$$E_{\text{SCHAUM}} = 0,7 * E_{\text{KOMPAKT}}$$

gleiches Gewicht



ermöglicht h + 40 %



Steifigkeit +90 %

gleiche Steifigkeit



ergibt sich bei h + 12 %



Gewicht -20 %

48

Durch das Schäumen wird die Dichte und der Zug-E-Modul auf jeden Fall verringert, was zu Bauteilen führt, die in kompakter und geschäumter Ausführung die gleiche Dicke aufweisen, aber mit signifikanten Gewichtsverringerungen. Das geschäumte Teil ist jedoch hinsichtlich der Biegefestigkeit im Nachteil. Diese Konstellation ist bei Teilen zu finden, die in nicht angepassten Werkzeugen sowohl

⁴⁷ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 146

⁴⁸ Vgl. Pollmann, 2014, S. 18

kompakt als auch geschäumt spritzgegossen werden. Wird die Wandstärke jedoch dicker ausgeführt, erhält man Teile mit dem Gewicht der kompakten Ausführung und deutlich größerer Biegefestigkeit. Dies ist für den Leichtbaugedanken aber nicht zielführend da das Bauteil das gleiche Gewicht aufweist wie das kompakt spritzgegossene. Daher werden Ausführungen gegenübergestellt bei denen bei geschäumten und kompakten Bauteilen die Biegefestigkeit gleich ist. Dafür wird die Wanddicke etwas vergrößert, damit die gleiche Biegefestigkeit erreicht und trotzdem Gewicht eingespart wird. Diese Gewichtsreduzierung ist die erwünschte effektive Gewichtseinsparung.⁴⁹

Um eine optimale Schaumstrukturausbildung zu erhalten, sollten die Werkstoffauswahl, das Bauteildesign, die Werkzeugtechnik, besonders die Angussauslegung und die Entlüftung, sowie geeignete Prozessbedingungen, wie die richtige Ausbalancierung der Kavitäten und die optimale Abstimmung der Parameter, genau beachtet werden.⁵⁰

Die charakteristischen Auswirkungen des Schaumspritzgießens auf die mechanischen Bauteileigenschaften sind in Abb. 11 veranschaulicht:

⁴⁹ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 146

⁵⁰ Vgl. Pollmann, 2014, S. 20

























kompakt	geschäumt (Integralschaumstruktur)		
	gleiche Wanddicke	gleiche Biegesteifigkeit	gleiches Artikelgewicht
Wanddicke 	 gleich	 etwas größer	 größer
Gewicht 	 kleiner	 etwas kleiner	 gleich
Biegesteifigkeit 	 kleiner	 gleich	 größer
Dichte 	 kleiner	 kleiner	 kleiner
E-Modul 	 kleiner	 kleiner	 kleiner
Widerstandsmoment 	 gleich	 etwas größer	 größer

Abb. 11 Charakteristische Auswirkungen des Schaumspritzgießens

Quelle: Altstätter, Volker ; Mantey, Axel: Thermoplast-Schaumspritzgießen – 1. Aufl. München : Hanser, 2010, S.146

Zur Vorhersage von Steifigkeits- und Festigkeitskennwerten gibt es eigens dafür ausgelegte Formeln. Als erstes betrachten wir die Steifigkeitskennwerte.

Vorhersage von Steifigkeitskennwerten:

Sobald die Erzeugnisdicke H und die Gesamtdichtereduktion $\Delta\rho$ eines Bauteils festgelegt sind, stehen auch die Deckschichtdicke D_e und die Dichtereduktion im Kern $\Delta\rho_k$ die zu erwarten sind, fest. Mit Hilfe der folgenden Formeln können die effektive Deckschichtdicke D_e und der effektive Kernschichtanteil k_e ermittelt werden.⁵¹

$$D_e = \frac{-H(1+\Delta\rho)}{9} + \frac{H}{5} + \frac{1}{3} \quad \text{für } H [\text{mm}] : [2,5; 10]$$

$$k_e = 1 - \frac{2 * D_e}{H}$$

⁵¹ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 157 ff.

Mit dem effektiven Kernschichtanteil kann die Dichtereduktion im Kern $\Delta\rho_k$ ermittelt werden.⁵²

$$\Delta\rho_k = \frac{1}{k_e} \left(\frac{3}{H} - 3,7 \right) + 4,5 \quad \text{für } H \text{ [mm]} : [2,5; 10]$$

Durch die gewählte Erzeugnisdicke und der Gesamtdichtereduktion ist die Schichtstruktur des Integralschaums entsprechend der Modellbildung vorbestimmt. Um die Steifigkeitskennwerte vorhersagen zu können, ist der Kernschicht-E-Modul mit folgender Formel zu berechnen. Bereits durchgeführte Messungen ergaben einen mittleren Wert von $n = 1,8$ für eine realitätsnahe Vorhersage.⁵³

$$E_k = E_0 * (1 - \Delta\rho_k)^n$$

Somit ergibt sich für den Biege-E-Modul E_B die Formel:

$$E_B = E_d * (1 - k_e^3) + E_k * k_e^3$$

Und auch der zu erwartende Zug-E-Modul E_Z kann mit den Eingangskennwerten ermittelt werden:

$$E_Z = E_d * (1 - k_e) + E_k * k_e$$

Für beide Formeln gilt: $E_0 = E_d =$ Kompaktwerkstoff-E-Modul

Mit dieser Modellbildung hat man ein praktisches Werkzeug zur Hand das über eine Vorhersagegenauigkeit von $\pm 10 \%$ verfügt. Diese Genauigkeit ist für die konstruktive Auslegung von schaumspitzgegossenen Bauteilen in der Regel exakt genug.⁵⁴

⁵² Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 157 ff.

⁵³ Vgl. ebenda

⁵⁴ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 163

Vorhersage von Festigkeitskennwerten:

Für die Ermittlung der Festigkeitskennwerte kann auf die vorgestellte Modellbildung aufgebaut werden. Für die Streck-Bruchspannung $\sigma_{y,z}$ ergibt sich bei Zugbelastung eine Analogie zur Vorhersage des Zug-E-Moduls.⁵⁵

$$\sigma_{y,z} = \sigma_{y,0} [k_e(1 - \Delta\rho_k)^n - k_e + 1]$$

$\sigma_{y,z}$ = Streckspannung der Integralschaumstruktur bei Zugbelastung

$\sigma_{y,z}$ = Streckspannung des Kompaktwerkstoffs

Um die Biegebelastbarkeit $\sigma_{y,B}$ berechnen zu können, müssen bei der Modellbildung Erweiterungen eingebracht werden. Dafür wird die Streckgrenze des kompakten Deckschichtwerkstoffs $E_{s,d}$ mit einbezogen. Durch diese Anpassung wird das, bei Biegebelastung den Spannungsabfall in den Deckschichten bewirkende, nichtlinear-viskoelastische Werkstoffverhalten näherungsweise mit in das Modell integriert.⁵⁶

$$\sigma_{y,B} = \sigma_{y,0} \left[k_e^3 \frac{E_d}{E_{s,d}} (1 - \Delta\rho_k)^n - k_e^3 + 1 \right]$$

$\sigma_{y,B}$ = Streckspannung der Integralschaumstruktur bei Biegebelastung

Die grundlegenden Effekte des Schäumens auf die Festigkeit sind ähnlich wie auf die Steifigkeit. Hinsichtlich einer reinen Zugbelastung ist die kompakte Ausführung bezogen auf die Steifigkeit als auch auf die Festigkeit im Vorteil. Hingegen ist bei reiner Biegebelastung, ausgelöst durch die Integralschaumstruktur, eine Verbesserung sowohl bei der gewichtsgezogenen Biegefestigkeit, als auch bei der gewichtsbezogenen Biegesteifigkeit, erkennbar.⁵⁷

⁵⁵ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 165

⁵⁶ Vgl. ebenda

⁵⁷ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 165

Thermoplastschaumspritzgießverfahren können grundsätzlich nach der Art der Treibmitteldosierung/-einbringung unterteilt werden. Die Hauptverfahren sind hierbei das chemische Schäumen und das physikalische Schäumen. Für das physikalische Schäumen wird im weiteren Verlauf das MuCell-Verfahren angewendet und erklärt, da dies das am häufigsten verbreitete und das am meisten fortgeschrittene, physikalische Verfahren ist. Im folgenden Verlauf werden nun diese beiden Verfahren genauer beschrieben und anschließend verglichen.

2.3 Chemisches Schaumspritzgießen

Beim chemischen Schaumspritzgießen werden dem Kunststoffgranulat, vor dem Einfüllen in den Trichter, spezielle chemische Treibmittel, so genannte Additive beigelegt. Während des Aufschmelzens des Thermoplasts zersetzen sich die Treibmittel (beliebt sind oftmals Natriumhydrogencarbonat oder Zitronensäurederivat) und setzen dabei ein Gas wie zum Beispiel Stickstoff oder Kohlendioxid frei, welches sich mit der Schmelze vermischt. Beim Einspritzen in das Werkzeug expandiert das Gas im weiteren Verlauf unter der Wärme- und Druckentwicklung. In besonderen Fällen können die thermische und die chemische Zersetzung überlagert werden, zum Beispiel bei der Kombination basischer und saurer Treibmittelwirkstoff.⁵⁸

Um eine bestmögliche, homogene Verteilung der Additive in der Schmelze zu gewährleisten und dadurch eine hohe Prozesssicherheit zu erreichen, benötigt man speziell auf diesen Anwendungsfall ausgelegte Schnecken. Die speziellen Schnecken können jedoch meist in Standardzylindern verwendet werden. Die verwendete Maschine muss darüber hinaus über eine aktive Staudruckregelung und eine Nadelverschlussdüse verfügen. Die aktive Staudruckregelung ermöglicht die Überwachung des Staudrucks im Zylinder, damit dieser durch die Additive nicht zu hoch wird. Die Nadelverschlussdüse hingegen verhindert ein Austreten der Schmelze während dem Dosiervorgang der Schmelze im Zylinder. Sind die genannten Voraussetzungen gegeben, kann das chemische Schäumen auch

⁵⁸ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 27

versuchsweise bei bestehenden Serienprozessen eingesetzt werden, um das Potenzial des Bauteils heraus zu finden. Das chemische Schaumspritzgießen eignet sich vor allem für Bauteile mit Wandstärken, die größer als 4 mm sind und in geringen Stückzahlen gefertigt werden.⁵⁹

In der Abb. 12 ist eine, für das chemische Schaumspritzgießen angepasste, Schnecke zu sehen:



Abb. 12 Chemische Schaumspritz-Schnecke

Quelle: www.kraussmaffei.com/media/files/kmdownloadlocal/de/IMM_BR_CellForm_de.pdf, S.9, abgerufen am 09.10.2014

Und im Vergleich dazu ist in Abb. 13 eine Standard-Schnecke für thermoplastische Kunststoffe zu sehen.



Abb. 13 Standard Schnecke

Quelle: www.groche.com/_user/customer/41/images/zoom/20080801131954_Standard_Schnecke.jpg, abgerufen am 09.10.2014

⁵⁹ Vgl. Kraus, 2014, S. 8 f.

Durch das chemische Schaumspritzgießen ist es möglich, Gewichtsersparnisse/Dichtereduktionen von bis zu 13 % zu erreichen, wenn man noch annähernd gleiche mechanische Eigenschaften der Bauteile erhalten will. Wenn die Bauteile mechanisch nicht stark beansprucht werden, sind Dichtereduktionen von bis zu 25 % realistisch. Die zu erreichende Gewichtsersparnis ist jedoch immer abhängig vom verwendeten Material und der Bauteilform.⁶⁰

Chemische Treibmittel werden oft als ungeeignet für das Schaumspritzgießen von kostenintensiven Hochtemperaturwerkstoffen angesehen, da sich bei höheren Verarbeitungstemperaturen ungleichmäßige Zellstrukturen einstellen. Eine Schmelzetemperatur von ca. 210° C hat sich bei vorausgegangenen Versuchen als optimal erwiesen, da diese in Kombination mit Einspritzgeschwindigkeiten von etwa 150 mm/s zur größten Dichtereduktion auf Grund der gleichmäßigen Schaumstruktur führt. Für die höchsten Dichtereduktionen werden 1,5 Gewichts-% Masterbatches verwendet, die mit Treibmittelkonzentrationen von bis zu 70 % beladen werden. Bezüglich der Oberflächenqualität muss beachtet werden, dass mit steigender Treibmittelkonzentration auch die Gefahr von Schlieren an der Bauteiloberfläche steigt. Dies wird bei Bauteilen im Sichtbereich von Fahrzeugen nicht geduldet und kann dazu führen, dass nur weniger Treibmittel verwendet werden kann, wodurch auch die zu erzielbare Dichtereduktion sinkt. Somit reicht die Oberflächenqualität je nach Treibmittelkonzentration von glatt bis schlierenbehaftet.⁶¹

Das chemische Schaumspritzgießen ist allgemein sehr gut reproduzierbar, jedoch können Schwankungen in der Prozessstabilität auftreten. Schwankungen der Prozessstabilität sind bei Serienanwendungen jedoch nicht akzeptabel, wodurch diese möglichst abgestellt werden müssen. Die Problematik liegt in der Dosierung des Treibmittels, da es trotz optimaler Dosierverhältnisse zu Schwankungen kommen kann, wenn die Verweilzeit der Polymerschmelze in der Plastifiziereinheit

⁶⁰ Vgl. Plastiker, 2014, S. 1

⁶¹ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 122 ff.

unterschiedlich ist da sich die Treibgase unterschiedlich verteilen können. Dieser Punkt sollte daher immer genau im Auge behalten werden, um eine gute Prozesstabilität zu erhalten.⁶²

Als Hilfsmittel dazu kann eine Dosiervverzögerung verwendet werden. Diese bewirkt, dass der Dosiervorgang erst kurz vor dem Einspritzen beendet wird. Dadurch wird auch die Gefahr verringert, dass durch abfallenden Staudruck (beispielsweise durch Leckage der Ringrückstromsperre) ein Aufschäumen der Schmelze bereits beim Einspritzen startet.⁶³

Beim chemischen Schaumspritzgießen besteht keine direkte Möglichkeit den Prozess zu beeinflussen. Dies ist nur indirekt über Temperaturführung und Schneckendrehzahl möglich, wodurch keine eindeutige Reproduzierbarkeit gegeben ist.⁶⁴

2.4 Physikalisches Schaumspritzgießen

Zur genaueren Betrachtung des physikalischen Schaumspritzgießens wird das MuCell-Verfahren verwendet, weil dieses das wohl bekannteste und am meisten verwendete physikalische Schaumspritzgießverfahren ist.

Der erste Durchbruch gelang der Trexel Inc. aus Massachusetts/USA Ende der 1990er Jahre, nachdem das Mucell-Verfahren Ende der 80er Jahre vom MIT – (Massachusetts Institute of Technologie) erfunden wurde. Damals jedoch noch mit dem Fokus auf Kunststoff-Extrusion. Dies änderte sich erst Anfang 2000 als das Spritzgießen immer mehr in den Mittelpunkt der Kunststoffindustrie rückte. Der Bekanntheitsgrad wuchs aber erst stark, nachdem die Firma Trexel im Jahre 2005, die bis dahin jährlich anfallenden, Lizenzgebühren abschaffte und das

⁶² Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 128

⁶³ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 128

⁶⁴ Vgl. Handschke / Mitzler, 2014, S. 4

Verfahren dadurch kostenseitig attraktiver/günstiger machte. Ein weiterer Punkt war, dass Trexel nach anfänglichen strategischen Fehlentscheidungen mehr und mehr die Anwender und OEMs informierte und nicht nur einen kleinen Insiderkreis von Verarbeitern und Werkzeugbauern, da diese mehr Einfluss auf die projektbezogene Verfahrenstechnik haben. Heute werden Komplettmaschinen von mehreren namhaften Maschinenherstellern in Zusammenarbeit mit Trexel vertrieben und bieten somit unter anderem einen unkomplizierten Einstieg in die Welt des physikalischen Schaumspritzgießens.⁶⁵

Als Equipment für das physikalische Schaumspritzgießen benötigt man eine voll geregelte Spritzgießmaschine inklusive Schneckenlageregelung und erhöhter Einspritzleistung. Hinzu kommen noch folgende Zusatzausstattungen für die Maschine:

- Plastifizierschnecke in Sonderlänge mit nachgeschalteter Gasmischstufe
- Massezylinder mit Gasinjektoren
- Gaseinheit zur Verdichtung und Mengenzudosierung des Gases
- Verfahrensspezifische Software zur Steuerung der Prozesse in der Spritzeinheit sowie
- Hin und wieder benötigt man auch einen Akku für schnelles Einspritzen mit einer adaptiven, selbstoptimierenden Einspritzgeschwindigkeitsregelung.⁶⁶

Herzstück der Maschine ist eine speziell für diesen Anwendungszweck ausgelegte Schnecke, mit speziellen Scher- und Mischteilen. Eine solche Schnecke ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

⁶⁵ Vgl. Handschke / Mitzler, 2012, S. 1

⁶⁶ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 107 f.

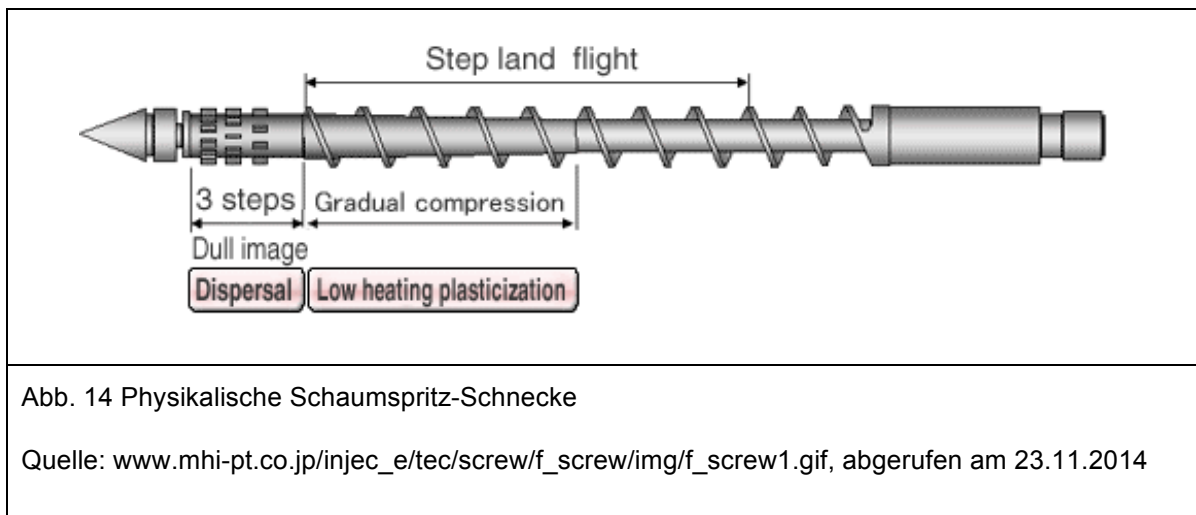


Abb. 14 Physikalische Schaumspritz-Schnecke

Quelle: www.mhi-pt.co.jp/injec_e/tec/screw/f_screw/img/f_screw1.gif, abgerufen am 23.11.2014

Beim Mucell-Prozess wird das Gas, meist Stickstoff N_2 oder Kohlendioxid CO_2 , während des Prozesses im überkritischen Zustand, auch SCF (Super Critical Fluid) genannt, im dadurch flüssigen Zustand mit 100 bis 250 bar unmittelbar in die Kunststoffschmelze injiziert. Die Schnecke vermischt anschließend das flüssige Treibfluid mit der Kunststoffschmelze und erzeugt ein homogenes, einphasiges Gemisch. Ein vorzeitiges Expandieren des Treibfluid-Schmelze-Gemischs nach vorne und Richtung Einzug, wird durch die Verschlussdüse und die Rückstromsperre der Schnecke verhindert. Die Schnecken-Lagepunkt-Regelung wird benötigt, damit der Schmelzedruck der Plastifizierung, über den gesamten Zyklus hinweg, nicht unter den kritischen SCF-Massedruck fallen darf. Die erhöhte Spritzleistung der Maschine wird benötigt, damit schnell eingespritzt werden kann, wodurch sicher gestellt wird, dass der Druckabfall und somit der Schäumprozess erst am Ende des Füllvorganges beginnt und somit auch am Ende des Fließwegs gesichert ist. Das schnelle Einspritzen wird durch die gesenkte Schmelzeviskosität, die durch das Gas entsteht, begünstigt.⁶⁷

⁶⁷ Vgl. Handschke / Mitzler, 2012, S. 2 f.

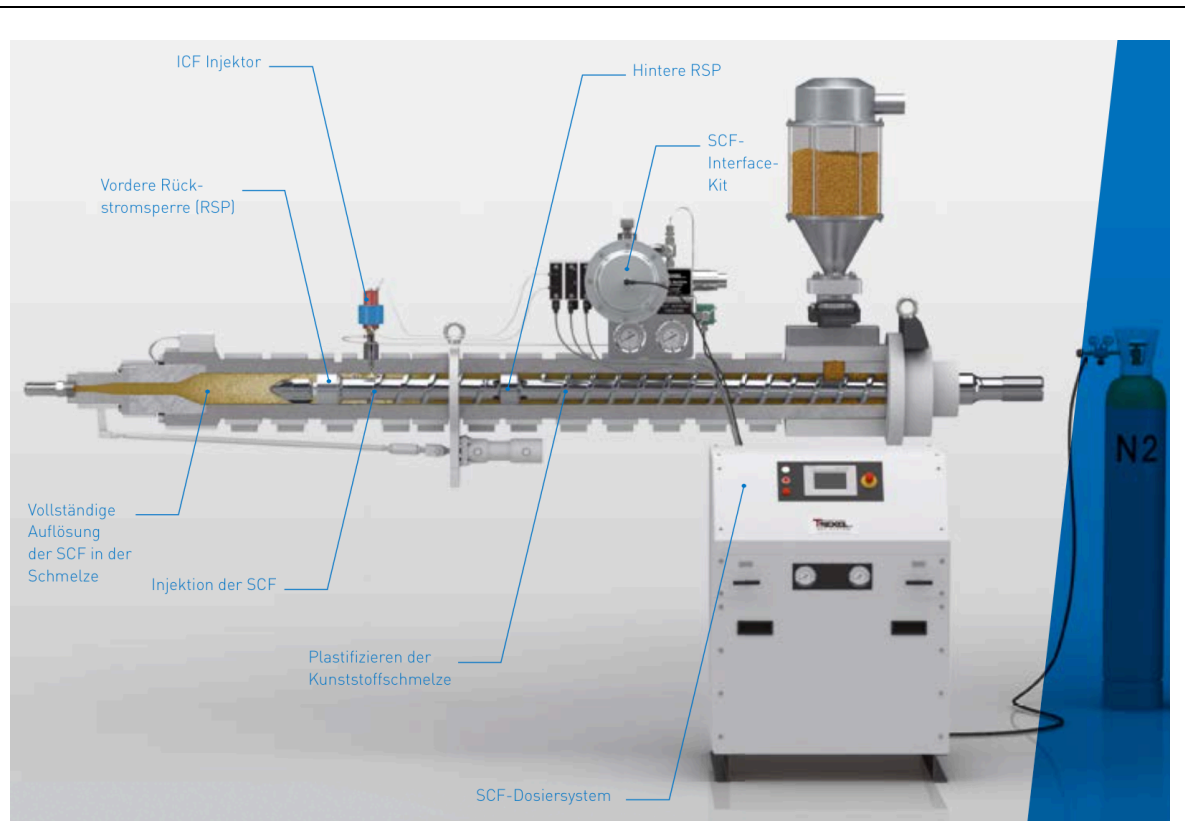


Abb. 15 MuCell Maschine

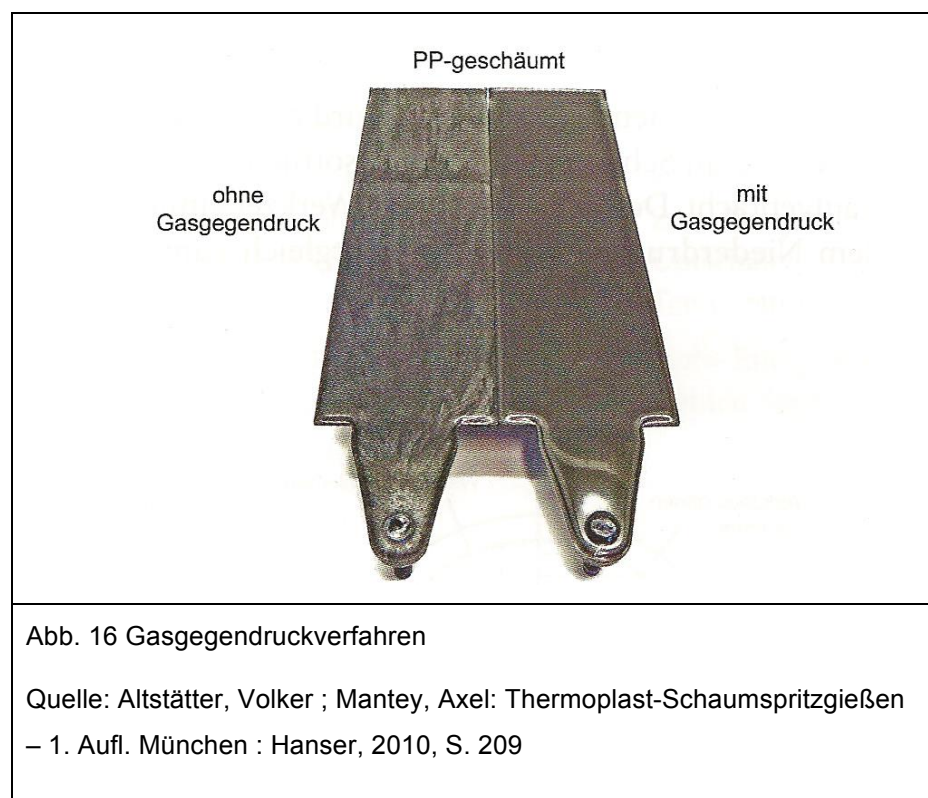
Quelle: www.kraussmaffei.com/media/files/kmdownloadlocal/de/IMM_BR_CellForm_de.pdf,
abgerufen am 09.10.2014

Durch den Druckabfall während des Einspritzens in die Kavität werden Gasbläschen gebildet, die das Aufschäumen bewirken. Im Gegensatz zum chemischen Schäumen sind es beim MuCell-Verfahren sehr viele fein verteilte Keime. Dadurch entwickeln sich viele kleine, gleich große und geschlossene Zellen mit einem Durchmesser unter 100 µm. Es entsteht eine Integralschaumstruktur - ein geschäumten Kern mit niedriger Dichte - der von einer dünnen, kompakten Deckschicht mit höherer Dichte umhüllt ist. Es entsteht eine geschlossene Oberfläche, die jedoch nicht mit der Oberflächenqualität von kompakt spritzgegossenen Bauteilen konkurrieren kann.⁶⁸

⁶⁸ Vgl. Handschke / Mitzler, 2012, S. 2 ff.

Unschöne Oberflächen können jedoch mittels variothermer Temperierung des Spritzgießwerkzeugs und mittels dem Gasgegendruckverfahren verhindert werden. Beide Verfahren sind jedoch werkzeugtechnisch sehr aufwendig. Beim Gasgegendruckverfahren wird in der Kavität, mittels Stickstoff, ein konstanter Druck aufgebaut. In Abb. ist das Ergebnis des Gasgegendruckverfahrens ersichtlich. Bei der variothermen Temperierung wird während dem Einspritzvorgang die Werkzeugkavität aufgeheizt und anschließend am Ende des Füllvorgangs wieder auf 20° C gekühlt.⁶⁹

Dies widerlegt die dritte These, welche besagt, dass das chemische Schaumspritzgießen hinsichtlich der Oberflächenqualität dem physikalischen Schaumspritzgießen immer überlegen sei. Zwar ist es beim physikalischen Schaumspritzgießen schwieriger, eine gute Oberfläche zu erhalten, aber durch die genannten Verfahren kann die Oberfläche auch das Niveau des chemischen Schaumspritzgießens erreichen.



⁶⁹ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 209 ff.

Hinsichtlich Homogenität der Zellengröße und Zellenverteilung ist das MuCell-Verfahren als sehr gut zu bewerten. Der Prozess ist zwar sehr komplex, jedoch durch die direkte Begasung eindeutig definiert und dadurch absolut reproduzierbar. Die Treibmittelkosten des physikalischen Schaumspritzgießens sind mindestens um 80 % niedriger als die des chemischen Schaumspritzgießens und betragen in etwa 0,3 €/kg.⁷⁰

Die üblichen Begasungskonzentrationen liegen je nach Material und Einsatzgrund zwischen 0,3 und 1 Gewichts-% Stickstoff. Der Begasungsdruck, der beim Öffnen des Injektors Schuss für Schuss ansteht, wird durch die ADPC-Automatic Delivery Pressure Control (Automatische Druck-Abgabe-Kontrolle) geregelt.

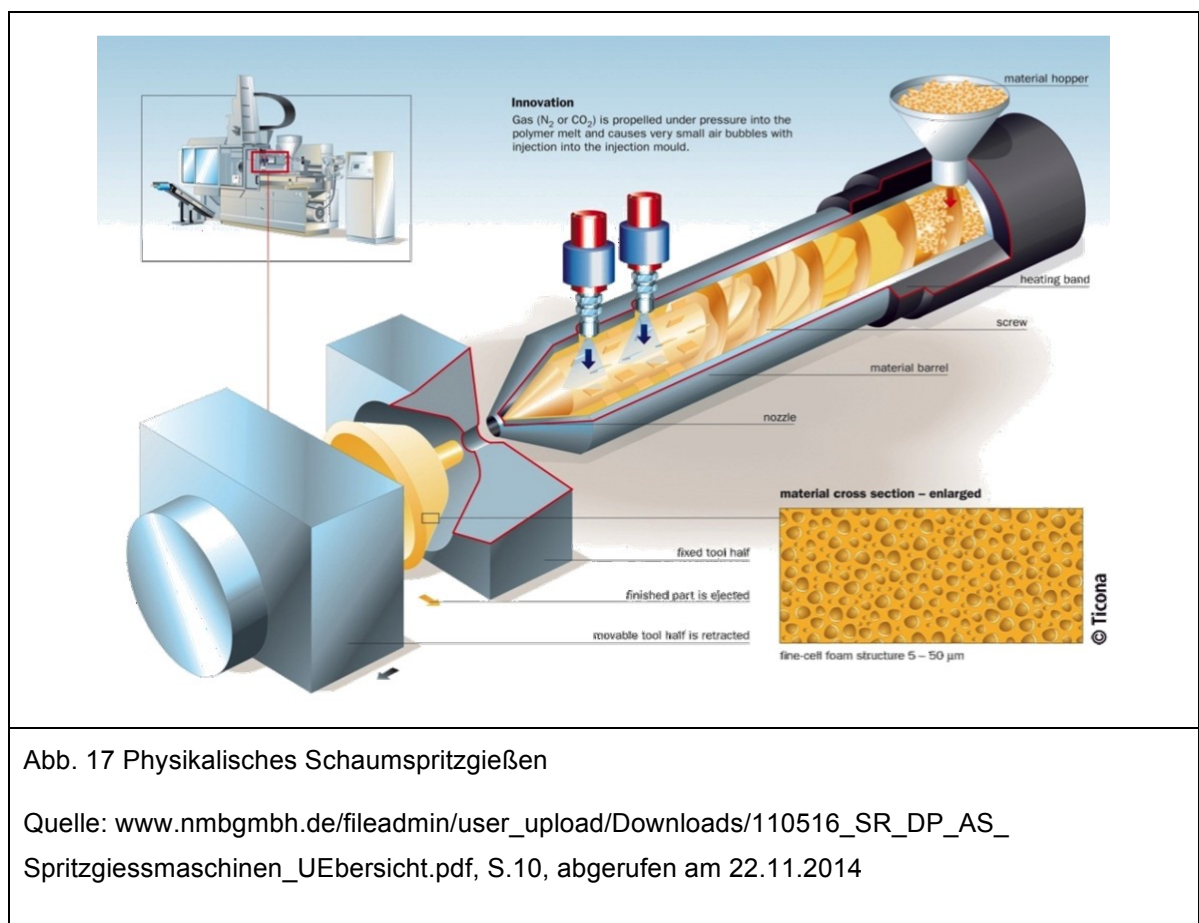


Abb. 17 Physikalisches Schaumspritzgießen

Quelle: www.nmbgmbh.de/fileadmin/user_upload/Downloads/110516_SR_DP_AS_Spritzgiessmaschinen_Uebersicht.pdf, S.10, abgerufen am 22.11.2014

Die Verwendung des Treibmittels Stickstoff oder Kohlendioxid ist immer vom Anwendungsfall und vom verwendeten Grundmaterial abhängig. Die Sorption des

⁷⁰ Vgl. Handschke / Mitzler, 2012, S. 4

Treibfluides Kohlendioxid ist beispielsweise in Polypropylen zwar um ein Vielfaches höher als die von Stickstoff, jedoch ist keine höhere Dichtereduktion mit Kohlendioxid möglich, obwohl theoretisch ein höherer Aufschäumgrad erreichbar wäre. Bei Stickstoff wurde in der Praxis festgestellt, dass eine gute Tauglichkeit für feinere und homogenere Schaumstruktur besteht. Zu begründen ist dies dadurch, dass der niedrigere Diffusionskoeffizient von Stickstoff in Polypropylen eine feinzellige und gleichmäßige Schaumstruktur bewirkt. In der Praxis wird oft auf zu hohe Dichtereduktionen verzichtet, um zu große Zellen und Lunker in den Bauteilen zu vermeiden, welche vom Aufschäumgrad abhängig sind. Hierbei sind drastische Unterschiede zwischen Kohlendioxid und Stickstoff ersichtlich. In Abb. 18 sind diese Unterschiede bei gleicher Dichtereduktion (5 %) und bei 180° C Schmelzetemperatur dargestellt. Kohlendioxid links und Stickstoff rechts. Hierbei sind die feinere Verteilung und die kleineren Blasen bei Stickstoff erkennbar.⁷¹

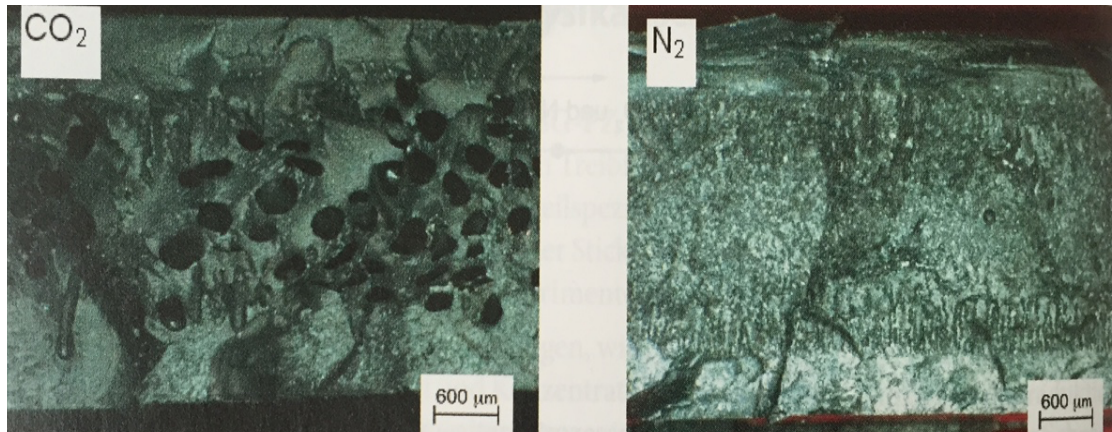


Abb. 18 Aufschäumgrad

Quelle: Altstätter, Volker ; Mantey, Axel: Thermoplast-Schaumspritzgießen – 1. Aufl. München : Hanser, 2010, S.132

⁷¹ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 131 ff.

Somit können mit Stickstoff in den meisten Fällen „bessere“ Bauteile gefertigt werden, die näher an die mechanischen Eigenschaften des Ausgangswerkstoffes heranreichen. Kohlendioxid wird nur selten eingesetzt. Der Grund dafür sind die im Vergleich kleineren Schaumzellen und die homogenere Verteilung der Schaumblasen beim Stickstoff. Dadurch erhält man jedoch auch nicht die maximale Gewichtsersparnis. Dies ist immer ein Frage der Auslegung, entweder will man möglichst gleiche mechanische Eigenschaften oder die maximal mögliche Gewichtsersparnis erreichen.⁷²

Bei Einsatz des physikalischen Schaumspritzgießen an bestehenden Bauteilen sind Gewichtseinsparungen von ca. 7 % bis 10% erreichbar. Bei Bauteilen, die speziell für MuCell ausgelegt sind, können Gewichtseinsparungen von bis zu 20% erreicht werden. Dies ist jedoch auch stark davon abhängig, inwiefern die mechanischen Bauteileigenschaften erhalten bleiben sollen oder ob es sich um wenig beanspruchte Bauteile handelt. Sind die mechanischen Eigenschaften nur nebensächlich, können noch weitaus höhere Gewichtseinsparungen erreicht werden.⁷³

Mit dem MuCell-Verfahren können heutzutage nicht nur Standardkunststoffe wie PP, PE-HD oder PS sondern auch technische Kunststoffe wie PC, PA und PC/ABS-Blends mit und auch ohne Füllstoffe oder Verstärkungsstoffe verarbeitet werden.⁷⁴

Für MuCell geeignete Bauteile sind alle Bauteile mit hohen Anforderungen an die Dimensionsstabilität, die jedoch auf Grund der unregelmäßigen Oberflächenstruktur nicht unbedingt im Sichtbereich verwendet werden sollten. Mit speziellen Optimierungen lassen sich die Bauteile aber auch im Sichtbereich verwenden. Selbst bei dünnwandigen Bauteilen lassen sich verbesserte

⁷² Vgl. Handschke / Mitzler, 2012, S. 2 ff.

⁷³ Vgl. ebenda

⁷⁴ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 109

Verzugseigenschaften und Gewichtsersparnis bei minimierter Schließkraft erzielen.⁷⁵

2.5 Vergleich der Verfahren

Vergleicht man nun das chemische und das physikalische Schaumspritzgießen erkennt man folgende charakteristischen Unterschiede:

- Das physikalische Schaumspritzgießen ist im Gegensatz zum chemischen Schaumspritzgießen Temperatureutral
- Bei den physikalischen Treibmitteln finden im Gegensatz zu den chemischen Treibmitteln keine Zersetzungsreaktionen statt sondern eine Ausdehnung auf Grund des geringeren Druckes in der Kavität
- Mit dem physikalischen Schaumspritzgießen sind größere Gewichtseinsparungen realisierbar
- Für das chemische Schaumspritzgießen ist keine spezielle Spritzgussmaschine bzw. kein spezielles Zubehör notwendig und es ist daher technisch einfacher umsetzbar und mit keinen größeren Investitionen verbunden
- Chemisches Schaumspritzgießen ist besser für dickwandige Bauteile geeignet als das Physikalische, das seine Stärken eher bei dünnwandigen Bauteilen ausspielen kann
- Die Vorteile der kürzeren Zykluszeiten, höhere Dimensionsstabilität und dadurch weniger Verzug, weniger Gewicht und weniger Material, weniger bis kein Nachdruck notwendig, reduzierte Schließkraft, Wanddickensprünge realisierbar ohne Einfallstellen, bessere Maßhaltigkeit der Teile, weniger / keine Einfallstellen, Erhöhung der Beigespannung und die Möglichkeit von längeren Fließwegen sind bei beiden Verfahren vorhanden
- Mit dem chemischen Schaumspritzgießen ist eine gute Oberfläche leichter erzielbar als mit dem physikalischen Schaumspritzgießen wo dies mit einem größeren Aufwand verbunden ist

⁷⁵ Vgl. Altstätter / Mantey, 2010, S. 109 f.

- Hinsichtlich Homogenität der Zellengröße und Zellenverteilung verzeichnet das Physikalische Verfahren/MuCell-Verfahren ein eindeutiges Plus. Der Prozess ist zwar komplexer, jedoch durch die direkte Begasung eindeutig definiert und dadurch absolut reproduzierbar.
- Die des physikalischen Schaumspritzgießens sind um mindestens 80 % niedriger als die des chemischen Schaumspritzgießen.

2.6 Vor- und Nachteile der Verfahren

Im folgenden Kapitel werden nun die Vor- und Nachteile der beiden Verfahren übersichtlich dargestellt.

Chemisches Schaumspritzgießen:

Tab. 1 Vor- Nachteile chemisches Schaumspritzgießen

Vorteile:	Nachteile:
<ul style="list-style-type: none"> • Keine hohen Investitionen notwendig • Einfacher Prozess und einfache Prozessführung bei hoher Prozessstabilität • Kann bei dickwandigen Bauteilen eingesetzt werden • Gute Oberflächenqualität erzielbar • Wenig bis kein Nachdruck notwendig • Kürzere Zykluszeiten • Höhere Dimensionsstabilität und dadurch weniger Verzug • Weniger Gewicht und weniger Material • Reduzierte Schließkraft • Wanddickensprünge realisierbar ohne Einfallstellen • Bessere Maßhaltigkeit der Teile • Längere Fließwege realisierbar • Erhöhung der Biegespannung • weniger / keine Einfallstellen 	<ul style="list-style-type: none"> • nicht temperaturneutral • bei geringer Einspritzgeschwindigkeit entsteht ein ungleichmäßiger Schaumkern • sehr dünne Deckschicht • Zersetzungsrückstände im Formteil unumgänglich • Oberflächenqualität ist abhängig von der Dichtereduktion • Keine sehr großen Dichtereduktionen möglich • Schlechtere mechanische Eigenschaften erzielbar • keine direkte Möglichkeit, den Prozess zu beeinflussen, nur indirekt über Temperaturführung und Schneckendrehzahl • keine eindeutige Reproduzierbarkeit • hohe Treibmittelkosten • Bestehende Werkzeugkonzepte lassen sich nicht immer zum Schaumspritzgießen nutzen

Quelle: eigene Tab.

Physikalisches Schaumspritzgießen:**Tab. 2 Vor- Nachteile physikalisches Schaumspritzgießen**

Vorteile:	Nachteile:
<ul style="list-style-type: none"> • Homogenität der Zellengröße und -verteilung • Temperaturneutral • Keine Zersetzungsrückstände im Formteil • Gleichmäßiger Schaumkern • Große Dichtereduktionen möglich • Gute mechanische Eigenschaften erzielbar • Wenig bis kein Nachdruck notwendig • Komplette reproduzierbar • Geringe Treibmittelkosten • Kürzere Zykluszeiten • Höhere Dimensionsstabilität und dadurch weniger Verzug • Weniger Gewicht und weniger Material • Reduzierte Schließkraft • Waddickensprünge realisierbar ohne Einfallstellen • Bessere Maßhaltigkeit der Teile • Längere Fließwege realisierbar • Erhöhung der Biegespannung • weniger / keine Einfallstellen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Oberflächenqualität nur mit großem Aufwand herstellbar • Verkürzter Plastifizierungsbereich auf Grund der Rückstromsperre • Komplexer Prozess • Bestehende Werkzeugkonzepte lassen sich nicht immer zum Schaumspritzgießen nutzen • Hohe Investitionskosten

Quelle: eigene Tab.

Betrachtet man die Vor- und Nachteile der beiden Verfahren, zeigt sich, dass das physikalische Schaumspritzgießen um einiges weniger Nachteile hat als das chemische Schaumspritzgießen.

Der Hauptvorteile des chemischen TSG bestehen vor allem in den niedrigen Investitionskosten, der guten erzielbaren Oberfläche und der einfachen Prozessführung. Und die Hauptnachteile sind die hohen Treibmittelkosten, die unumgänglichen Zersetzungsrückstände im fertigen Bauteil und die nicht so hohen möglichen Dichtereduktionen.

Beim physikalischen Schaumspritzgießen liegen die Hauptvorteile eindeutig bei den geringen Treibmittelkosten, dem gleichmäßigen Schaumkern, den guten mechanischen Eigenschaften auf Grund der homogenen Zellgröße beziehungsweise -verteilung und den Bauteilen ohne Zersetzungsrückstände. Die Hauptnachteile des physikalischen Schaumspritzgießens liegen hingegen bei den hohen Investitionskosten und der schlechteren Oberflächenqualität.

Die grundlegenden Vorteile des Schaumspritzgießens bestehen bei beiden Verfahren gleichermaßen.

Hinsichtlich Vor- und Nachteile zeigt sich dadurch ein deutliches Plus für das physikalische Schaumspritzgießen da es weniger Nachteile besitzt als das chemische Schaumspritzgießen.

2.7 Anwendungsbeispiele

In Abb. 19 ist ein Luftfiltergehäuse aus dem Material PA6GF30 dargestellt. Die Oberschale hatte ein Ausgangsgewicht von 1070 g. Nach der Umstellung auf das physikalische Schaumspritzgießen kommt man auf ein Bauteilgewicht von 1020 g. Die Unterschale wog vorher 3100 g und danach 2880 g.

Das ergibt eine Gesamtgewichtseinsparung von 270 g oder in Prozent 6,5 %.

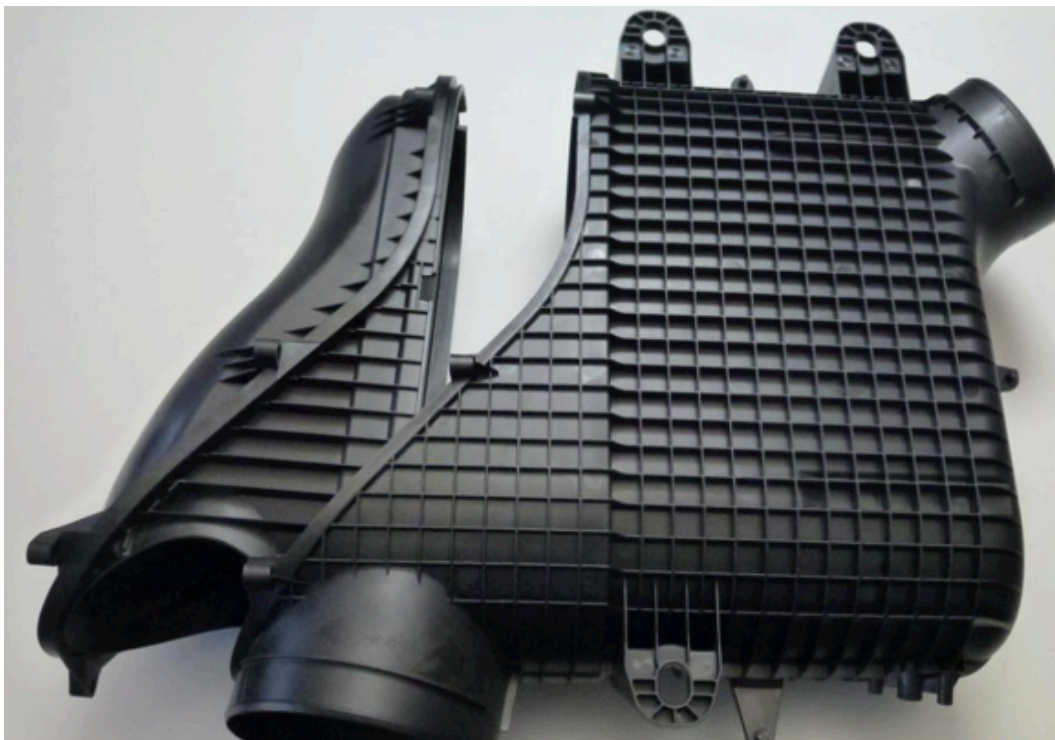


Abb. 19 Luftfiltergehäuse PA6GF30

Quelle: eigene Abbildung

Auf Abb. 20 sieht man eine Kfz-Türinnentragstruktur bei der durch Umstellung auf chemisches Schaumspritzgießen eine Gewichts- und Materialeinsparung von ca. 10 % erreicht werden könnte.



Abb. 20 PP Türinnentragstruktur chemisch geschäumt

Quelle: Altstätter, Volker ; Mantey, Axel: Thermoplast-Schaumspritzgießen – 1. Aufl.
München : Hanser, 2010 S. 219

Auf der Abb. 21 ist ein Luftfiltergehäuse aus Polamid dargestellt. Durch physikalisches Schaumspritzgießen wurde eine Gewichts- und Materialeinsparung von 15 % bei vergleichbaren mechanischen Eigenschaften erreicht.



Abb. 21 Luftfiltergehäuse Polyamid

Quelle: eigene Abbildung

3 Wirtschaftliche Betrachtung der Verfahren

Auf Grund der unterschiedlichen Treibmittelanteile, Treibmittelkosten und Gewichtersparnisse ergeben sich unterschiedliche Kosteneinsparungspotenziale der beiden Schaumspritzgussverfahren gegenüber dem Standard Spritzgießen. Diese Gegebenheit wird in Tabelle 3 aufgezeigt.

Als Ausgangswerte wurden 35 % Mehrinvestitionen für das MuCell Verfahren angenommen. Dies stellt einen realistischen Wert dar. Beim chemischen Schaumspritzgießen wird ein deutlich geringerer Wert von 2 % veranschlagt da die Investitionskosten deutlich geringer sind. Die Angaben hinsichtlich Anzahl der Kavitäten, Schussgewicht, Gewichtersparnis, Zykluszeit und Zykluszeitoptimierung wurden Anhand des, in Abb. 21 gezeigten, Luftfiltergehäuses gewählt, da hierzu die Werte durch Versuche bekannt sind. Auch die Materialkosten, die Jahresproduktionsstunden und die Anzahl der Teile pro Jahr wurden von diesem Bauteil übernommen, da dies ein typisches Projekt in der Automobilindustrie widerspiegelt und die Werte aus dem laufenden Projekt bekannt sind. Deutlich erkennbar ist, dass sich die, bereits im Kapitel 2.4 angesprochenen, um mindestens 80 % günstigeren Treibmittelkosten des MuCell-Verfahrens auffallend stark auswirken. Allein bei einem Teil sind die Kosten beim MuCell-Verfahren um 25 Cent geringer, als beim chemischen Schaumspritzgießen. Durch die um 20 % verringerte Zykluszeit, erhöht sich die in den gleichen Jahresproduktionsstunden produzierbaren Teile von 450.000 Stück auf 540.000 Stück pro Jahr. Mit 678.334,50 € Gesamteinsparung pro Jahr spart das MuCell-Verfahren um 168.228,90 € mehr pro Jahr ein als das chemische TSG mit 510.105,60 € Gesamteinsparung. Unverkennbar ist, dass beide Verfahren ein klares Einsparpotenzial gegenüber dem Standard Spritzgussverfahren bieten.

Tab. 3 Kosteneinsparungspotential - Verfahren im Vergleich

Verfahren		Standard	MuCell TSG	Chemisches TSG
Mehrinvestition für Maschine	%	0	35	2
Anzahl Kavitäten		2	2	2
Schussgewicht pro Teil	kg	3	2,55	2,64
Gewichtersparnis pro Teil	%	0	15	12
Zykluszeit	s	60	48	48
Optimierung Zykluszeit	%	0	20	20
Materialpreis (Beispiel Polyamid)	€/kg	2,80	2,80	2,80
Materialkosten pro Teil	€/Teil	8,40	7,14	7,39
Materialkostensparnis	€/Teil	0	1,26	1,01
Treibmittelanteil	%	0	0,5	1,5
Treibmittelkosten	€/kg	0	0,3	1,6
Treibmittelkosten pro Teil	€/Teil	0	0,003825	0,06336
Jahresproduktionsstunden	h	3750	3750	3750
Anzahl Teile pro Jahr		450.000	540.000	540.000
Treibmittelkosten pro Jahr	€	0	2.065,50	34.214,40
Materialkostensparnis pro Jahr	€	0	680.400	544.320
Gesamteinsparung pro Jahr	€	0	<u>678.334,50</u>	<u>510.105,60</u>

Quelle: Vgl. www.kraussmaffei.com/media/files/kmdownloadlocal/de/Physikalisches_Schaeumen_102012.pdf, verfügbar am 15.10.2014

Bis zum Jahr 2005 hatte das MuCell-Verfahren einen großen Kostennachteil, denn bis zu diesem Jahr, wurde von der Firma Trexel eine Lizenzgebühr für das MuCell-Verfahren verlangt, die am jährlichen Umsatz bemessen wurde. Diese Lizenzgebühr ist jetzt nicht mehr vorhanden und das Verfahren dadurch nun auch aus Kostensicht sehr attraktiv. Durch die Abschaffung der Lizenzgebühr erlangte das Verfahren mit den Jahren immer mehr an Aufmerksamkeit in der Industrie.

Im weiteren Verlauf werden nun zwei investitionsbezogene Berechnungen durchgeführt. Einerseits die Rentabilitätsrechnung und andererseits die Amortisationsrechnung. Die Ergebnisse werden dann im Punkt 5.2 Ergebnisanalyse genauer betrachtet und bewertet. Es handelt sich hierbei um zwei statische Investitionsrechnungsverfahren. Die statischen Verfahren sind zwar auf Grund der Vereinfachung, hinsichtlich der dynamischen Verfahren ungenauer als die dynamischen Verfahren, jedoch werden für die dynamischen Verfahren viele Unternehmensbezogene Angaben benötigt die leider nicht vorhanden sind.

3.1 Rentabilitätsrechnung – Return on Investment

Als erstes wird die Rentabilitätsrechnung, auch Return on Investment genannt, beschrieben und anschließend das Mucell-Verfahren und das chemische Schaumspritzgießen damit berechnet. Damit können beide Verfahren hinsichtlich Rentabilität verglichen werden.

3.1.1 Theorie

Die Rentabilitätsrechnung, Rentabilitätsvergleichsrechnung oder Return on Investment (ROI) ist ein statisches Verfahren der Investitionsrechnung. Es wird verwendet um Investitionsgewinne mit verschiedenen Kapitaleinsätzen zu vergleichen, wenn das Kapital nicht uneingeschränkt zur Verfügung steht. Grundlage für das Verfahren ist die Kostenvergleichs- oder Gewinn(vergleichs)rechnung. Im Gegensatz zu diesen beiden Verfahren berücksichtigt die Rentabilitätsrechnung, dass unterschiedliche Investitionsobjekte unterschiedlich viel Kapital binden. Dafür werden die jährlichen Gewinne der Investition mit ihrem durchschnittlichen Kapitaleinsatz ins Verhältnis gesetzt.⁷⁶

Die Formel dafür sieht folgendermaßen aus:

$$ROI = \frac{\text{Gewinn}}{\text{inv. Kapital}}$$

⁷⁶ Vgl. Heesen, 2010, S. 19 f.

Ein positiver ROI bedeutet:

- der investierte Kapitaleinsatz wird erwirtschaftet
- laufende Kosten werden gedeckt
- auf das Kapital wird eine Rendite erzielt

Vergleicht man nun für einzelne Investitionen der Rentabilität mit der geforderten Mindestrendite, kann man die Vorteilhaftigkeit feststellen. Liegt die Rentabilität darüber, ist die Investition aussichtsreich, liegt sie jedoch darunter, sollte die Investition nicht durchgeführt werden.⁷⁷

3.1.2 Berechnung der Verfahren

Da auf Grund fehlender Daten, wie Personalkosten und dergleichen, keine Kostenvergleichsrechnung aufgestellt werden kann, werden für die zwei Verfahren, Werte für den Kapitaleinsatz angenommen. Als Grundlage dafür wird eine Standard Spritzgussmaschine mit einem Kapitaleinsatz von 300.000 € angenommen. Daraus ergeben sich auf Grund der Mehrinvestitionssätze aus Tabelle 3: 405.000 € (+35 %) für das MuCell-Verfahren und 306.000 € (+2 %) für das chemische TSG.

Als Gewinne werden zur Vereinfachung die bereits in Tabelle 3 ermittelten Gesamteinsparungen beider Verfahren pro Jahr verwendet.

MuCell: $ROI = \frac{\text{Gewinn}}{\text{inv.Kapital}}$ $ROI = \frac{678.334,50 \text{ €}}{405.000 \text{ €}} = 1,6749 = 167,5 \%$

chemisches TSG: $ROI = \frac{\text{Gewinn}}{\text{inv.Kapital}}$ $ROI = \frac{510.105,60 \text{ €}}{306.000 \text{ €}} = 1,6670 = 166,7 \%$

⁷⁷ Vgl. Heesen, 2010, S. 19 f.

Tab. 4 Rentabilitätsrechnung

	MuCell	chemisches TSG
Kapitaleinsatz	405.000 €	306.000 €
Gewinn	678.334,50 €	510.105,60 €
Rendite	<u>167,5 %</u>	<u>166,7 %</u>

Quelle: eigene Tab.

Der ROI beziehungsweise die Rendite beträgt also beim Mucell 167,5 % und beim chemisches TSG 166,7 %.

Es ist zu erkennen, dass beide Verfahren beinahe gleich gute Ergebnisse erzielen. Das MuCell-Verfahren erweist sich, trotz deutlich höherem Kapitaleinsatz gegenüber dem chemischen TSG, um 0,8 % besser. Der Grund dafür liegt bei dem, gegenüber dem chemischen TSG, deutlich höheren Gewinn, der in der Berechnung den höheren Kapitaleinsatz ausgleicht.

Dadurch, dass beide Verfahren einen sehr hohen ROI von über 100 % haben, wird bei beiden Verfahren das investierte Kapital zu 100 % wieder eingenommen.

3.2 Amortisationsrechnung

Als nächstes wird die Amortisationsrechnung vorgestellt und danach das Mucell-Verfahren und das chemische Schaumspritzgießen damit berechnet. Mit den Ergebnissen können die beiden Verfahren dann hinsichtlich Amortisationszeit verglichen werden.

3.2.1 Theorie

Die Amortisationsrechnung, auch Amortisationsvergleichsrechnung, Kapitalrückfluss, Pay-off- oder Pay-back-Methode genannt, liegt der Überlegung zu Grunde, ob und wie schnell sich eine Investition in einem geplanten oder gewünschten Zeitraum amortisiert oder nicht. Die Investitionsentscheidung oder der Vergleich mehrerer Investitionen hängt damit von der Amortisationsdauer ab. Bei der Amortisationsrechnung wird wie bei der Rentabilitätsrechnung auf die Kosten- oder Gewinnrechnung aufgebaut. Durch diese wird ermittelt, welcher Zeitraum notwendig ist, damit die Anschaffungszahlungen über die Erlöse wieder ins Unternehmen fließen und für neue Investitionen zur Verfügung stehen. Eine Investition hat sich also amortisiert, sobald die Erlöse die Anschaffungszahlung und die laufenden Betriebskosten decken. Das Verfahren ist also nicht an Vermögens- oder Gewinnstreben interessiert, sondern dient zur überschlägigen Risikoeinschätzung und hat somit ein Sicherheitsstreben. Der Wiedergewinnungszeitraum des eingesetzten Kapitals erfolgt aus dem Rückfluss („Cash Flow“ beziehungsweise in Deutsch „Einzahlungsüberschuss“ genannt) der Investition.⁷⁸

Bei der Amortisationsdauer ist die Prämisse: je kürzer desto besser.

⁷⁸ Vgl. Heesen, 2010, S. 21 f.

Die Formel dafür sieht folgendermaßen aus:

$$\text{Amortisationsdauer} = \frac{\text{Kapitaleinsatz}}{\text{Rückfluss (p. a.)}}$$

Als Ergebnis, erhält man die Zeit, in der das investierte Kapital zurückgeflossen ist und sich mit den Anschaffungszahlungen deckt.

Es gibt zwei Varianten der Amortisationsrechnung:

- Durchschnittsmethode (einperiodisches / statisches Verfahren)
- Kumulationsmethode (mehrperiodisches / dynamisches Verfahren)

Für die Durchschnittsmethode verwendet man, wie der Name schon bereits sagt, Durchschnittswerte für den Rückfluss. Im Rückfluss ist auch die Abschreibung (abgekürzt Afa) enthalten.

Bei der Kumulationsmethode werden die einzelnen, unterschiedlichen Einzahlungsüberschüsse pro Periode addiert. Die Rückflüsse werden dabei nach Jahren differenziert und schrittweise, Jahr für Jahr addiert bis der Kapitaleinsatz erreicht ist und somit die Amortisationszeit bekannt ist.

3.2.2 Berechnung der Verfahren

Auf Grund von fehlenden Daten kann keine Kostenvergleichsrechnung aufgestellt werden. Daher werden für die zwei Verfahren wieder die Werte wie bereits im Kapitel 3.1.2 angenommen. Das bedeutet, dass der Kapitaleinsatz für das MuCell-Verfahren 405.000 € und 306.000 € für das chemische TSG beträgt. Als Rückfluss werden zur Vereinfachung wieder die bereits in Tabelle 3 ermittelten Gesamteinsparungen beider Verfahren pro Jahr verwendet plus die Abschreibung (Afa) der Maschine auf 13 Jahre und der Restwert wird mit 0 angenommen.

MuCell:

$$Afa = \frac{\text{Bemessungswert} - \text{Restwert}}{\text{Nutzungsdauer}} = \frac{405.000 \text{ €} - 0}{13 \text{ Jahre}} = 31.153,85 \text{ €}$$

$$\text{Amortisationsdauer} = \frac{\text{Kapitaleinsatz}}{\text{Rückfluss (p. a.)}} = \frac{405.000 \text{ €}}{709.488,35 \text{ €}} = 0,57 \text{ Jahre}$$

chemisches TSG:

$$Afa = \frac{\text{Bemessungswert} - \text{Restwert}}{\text{Nutzungsdauer}} = \frac{306.000 \text{ €} - 0}{13 \text{ Jahre}} = 23.538,46 \text{ €}$$

$$\text{Amortisationsdauer} = \frac{\text{Kapitaleinsatz}}{\text{Rückfluss (p. a.)}} = \frac{306.000 \text{ €}}{533.644,06 \text{ €}} = 0,96 \text{ Jahre}$$

Tab. 5 Amortisationsrechnung

	MuCell	chemisches TSG
Kapitaleinsatz	405.000 €	306.000 €
/ Gewinn	678.334,50 €	510.105,60 €
= Rendite (ROI)	167,5 %	166,7 %
+ Abschreibung (Afa)	31.153,85 €	23.538,46 €
= Cash Flow	709.488,35 €	533.644,06 €
Amortisationsdauer	<u>0,57 Jahre</u>	<u>0,96 Jahre</u>

Quelle: eigene Tab.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich das MuCell-Verfahren beinahe doppelt so schnell amortisiert wie das chemische Schaumspritzgießen. Das MuCell-Verfahren amortisiert sich mit den verwendeten Stückzahlen und den anderen Werten bereits innerhalb von fast einem halben Jahr.

Die Ergebnisse der Rentabilitätsrechnung und der Amortisationsrechnung zeigen, dass sich die erste These, dass man auf Grund von höheren Investitionskosten und größerem Maschinenaufwand davon ausgeht, dass das physikalische Schäumen wirtschaftlich dem chemischen Schäumen, auf Grund der höheren Investitionskosten, unterlegen ist, nicht bestätigt.

Auch die zweite These, dass das Anwenden der Leichtbaumaßnahme Schaumspritzgießen immer die Bauteilkosten erhöht, weil sich die Treibmittelkosten auf die Materialkosten aufaddieren, ist damit nicht als richtig zu sehen.

4 Chancen und Risiken

Mit dem Schaumspritzgießen ist es, wie mit allen anderen Technologien die man zum ersten Mal im Unternehmen verwendet. Die endgültigen und kompletten Chancen und Risiken zeigen sich erst restlos während der Verwendung in der Praxis und mit der Zeit lernt man mit ihnen durch steigende Erfahrungen umzugehen. Dennoch soll in den nächsten beiden Abschnitten auf die möglichen Chancen und Risiken sowohl für Automobilhersteller als auch für Zulieferer eingegangen werden.

4.1 Chancen und Risiken für den Automobilhersteller

Chancen:

Die größte Chance liegt für Automobilhersteller sicherlich darin leichtere Bauteile zu erhalten, durch die es möglich ist, leichtere Fahrzeuge zu produzieren, wodurch dann der Verbrauch verbessert wird und als Folge davon auch der CO₂-Ausstoß verringert wird. Somit können strengere Richtlinien eingehalten und Strafzahlungen abgewendet werden.

Natürlich ist auch die mögliche Kostenreduktion der Bauteile eine große Chance für die Automobilhersteller, Kosten einzusparen. Es besteht auch die Chance, qualitativ hochwertigere Bauteile, durch verringerte Einfallstellen und weniger Verzug, von den Zulieferern zu erhalten. Durch maßgenauere Bauteile können auch engere Bauteiltoleranzen angezogen werden.

Auch höhere Jahresstückzahlen sind einfacher umsetzbar auf Grund der geringeren Zykluszeit und dadurch können auch Lagermengen reduziert werden, da schneller nachproduziert werden kann. Dies spart durchaus auch Lagerkosten. Eine etwas nebensächliche Chance ist die Möglichkeit des einfacheren Handlings größerer Bauteile durch das geringere Bauteilgewicht. Dies betrifft einerseits Werksarbeiter, die weniger Gewicht heben müssen und andererseits aber auch Logistik- und Versandaufwand.

Risiken:

Ein großes Risiko bergen die verminderten mechanischen Bauteileigenschaften, die möglicherweise auf den ersten Blick nur geringe Minderungen aufweisen, aber nach der Bauteilalterung auftreten könnten. Daher ist es sehr wichtig umfangreiche Bauteilerprobungen durchzuführen, um die mechanischen Eigenschaften auch unter Temperatur- und Alterungseinfluss zu überprüfen. Ein weiteres Risiko betrifft die Oberflächenqualität der Bauteile. Wenn diese nicht ausgemerzt werden können, kann dies bei Sichtteilen, beispielsweise im Motorraum, zu einer schlechten Qualitätsanmutung für Kunden führen, was natürlich Imageschäden nach sich ziehen kann.

4.2 Chancen und Risiken für den Zulieferer**Chancen:**

Für die Zulieferer der Automobilindustrie ergeben sich durch das Schaumspritzgießen Chancen hinsichtlich der besseren Maschinenauslastung auf Grund verringerter Zykluszeiten. Bei gleichem Jahresstundeneinsatz der Maschine können mehr Bauteile, oder bei weniger Zeiteinsatz der Maschine die gleiche Bauteilanzahl gefertigt werden.

Es können deutlich genauere Bauteile gefertigt werden, da sich weniger Verzug bei den Teilen einstellt und weniger Schwankungen in den Bauteilmaßen vorhanden sind. Dies ermöglicht auch unverkennbar einfachere Prozessführungen bezogen auf die Schwankungen. Die Bauteile weisen markant geringere Einfallstellen auf, wodurch Probleme mit den Qualitätsabteilungen der Automobilhersteller verringert werden können.

Durch die geringere notwendige Schließkraft bestehen Chancen, dass kleinere Spritzgießmaschinen mit geringerer Schließkraft verwendet werden können. Dadurch können Kapazitäten der größeren Maschinen für größere Bauteile freigegeben werden oder es können Neuinvestitionen in neue, größere Maschinen vermieden werden.

Risiken:

Ein mögliches Risiko besteht im Preisverfall der Kunststoffbauteile, wenn die Automobilhersteller davon ausgehen, dass immer schaumgespritzt werden soll. Auf Grund der höheren Maschinenauslastung ist natürlich das Risiko bei einem Maschinenausfall größer, weil eine größere Stückzahl betroffen ist und dadurch Lieferschwierigkeiten auftreten können.

Um das Risiko von falscher Prozessführung oder falscher Maschineneinstellung gering zu halten, sind ausreichend Mitarbeiterschulungen einzuplanen. Ein weiteres Risiko besteht auch in der Bauteilauslegung.

Werden die mechanischen Bauteileigenschaften im vorhinein falsch eingeschätzt und erst durch Bauteiltests und Erprobungen erkannt, kann dies dazu führen, dass Anforderungen nicht erfüllt werden und im Nachhinein teure Werkzeuganpassungen notwendig sind.

Das Risiko erhöht sich zudem dadurch, dass eine zusätzliche Abhängigkeit von einem Treibfluidzulieferer/Masterbatchhersteller besteht und bei einem Ausfall Probleme entstehen können.

Die Oberflächenqualität birgt auch ein gewisses Risiko, da immer die Möglichkeit besteht, dass die Probleme nicht ausgemerzt werden können oder für eine Verbesserung zusätzliche, nicht eingeplante Investitionen anfallen.

5 Fazit und Ausblick

Zum Abschluss sollen nun die Ergebnisse der wirtschaftlichen Betrachtung gesammelt, aufgezeigt und analysiert werden um dann ein abschließendes Fazit und einen Ausblick aufzuzeigen.

5.1 Ergebnis

Blickt man auf die Ergebnisse der beispielhaften Rentabilitätsrechnung und der Amortisationsrechnung, zeigt sich ein Vorteil hinsichtlich Amortisationszeit und Rentabilität, für das physikalische Schaumspritzgießen, trotz der höheren Investitionen.

Auch bezogen auf die spezifischen Vor- und Nachteile erweist sich das physikalische Schaumspritzgießverfahren bis auf die Oberflächenqualität, die beim chemischen Schaumspritzgießen besser ist, als vorteilhafter.

Allgemein gesehen zeigt sich das Schaumspritzgießen an sich gegenüber dem kompakten/gewöhnlichen Spritzgießen mit vielen Vorteilen und ist somit eine wirkliche Alternative.

5.2 Ergebnisanalyse

Sieht man sich die Berechnungsergebnisse beispielhaften Rentabilitätsrechnung und der Amortisationsrechnung genauer an, ist erkennbar, dass ein ausschlaggebender Punkt die Unterschiede in den Treibmittelkosten ist. Diese sind beim physikalischen Schaumspritzgießen viel geringer als beim chemischen Schaumspritzgießen und wirken sich daher sehr stark bei hohen Stückzahlen und höheren Bauteilgewichten aus.

Bei geringeren Stückzahlen und geringeren Bauteilgewichten, als bei den in den Berechnungen angenommenen Werten, könnten die Ergebnisse zu Gunsten des chemischen Schaumspritzgießens ausfallen. Dies ist also immer sehr vom

spezifischen Anwendungsfall abhängig. Für Unternehmens- und Projektbezogene Betrachtungen der Verfahren ist es jedoch ratsam dynamische Investitionsrechnungsverfahren für die Vergleiche zu verwenden um genauere Ergebnisse zu erhalten. Diese Verfahren stellen dann ja kein Problem dar weil die notwendigen Unternehmensspezifischen Daten in den Unternehmen vorhanden sind.

5.3 Fazit

Als Fazit kann gesagt werden, dass das Schaumspritzgießen ein sehr gutes Verfahren ist, um Leichtbaukunststoffteile zu erzeugen. Dies muss auch nicht unweigerlich dazu führen, dass die Bauteile teurer werden, sondern kann sogar ein Kosteneinsparpotential bieten. Je höher die Stückzahlen sind, desto rentabler ist das Schaumspritzgießen und da die Stückzahlen in der Automobilindustrie bekanntlich recht hoch sind und auch durch Baukastensysteme, bei denen gleiche Bauteile in vielen verschiedenen Fahrzeugmodellen zum Einsatz kommen, wahrscheinlich noch höher werden, bieten sich die Schaumspritzgießverfahren dafür perfekt an. Dies gilt auch wenn dafür anfangs hohe Investitionen notwendig sind, die sich jedoch meist schnell amortisieren.

Es wird auch ersichtlich, dass das Schaumspritzgießen nicht nur Vorteile hinsichtlich des Bauteilgewichts bietet, sondern auch bezüglich Bauteilqualität. Es zeigen sich Verbesserungen des Verzugs und geringere Einfallstellen, aber auch Vorteile bezogen auf die Maschineneinstellungen wie Schließkraft und Nachdruck wodurch sich die Zykluszeit markant verringert.

Die anfangs aufgestellten Thesen konnten durch genaue Betrachtung und Berechnung der Verfahren allesamt widerlegt werden.

Durch die vielen Vorteile ergeben sich viele Möglichkeiten, die sich positiv auf die Bauteile und die Produktion auswirken. Diese Möglichkeiten sollten genutzt werden, vor allem seitdem für das Mucell-Verfahren keine Lizenzgebühren mehr gezahlt werden müssen.

5.4 Ausblick

In Zukunft wird das Schaumspritzgießen in der Automobilindustrie eine immer größere Rolle spielen, um möglichst leichte Kunststoffbauteile einsetzen zu können. Dies wird grundlegend sein um zukünftige CO₂-Regelungen und Gesetze einhalten zu können.

Dadurch, dass das Schaumspritzgießen die Bauteile nicht zwangsweise verteuert, steht dem Verfahren nichts Nennenswertes im Weg um sich immer weiter in der Automobilindustrie auszubreiten.

Einzig hinsichtlich der Oberflächenqualität wäre noch etwas Handlungsbedarf. Denn wenn man es schaffen würde, dass die Oberflächenqualität verbessert wird und dadurch geschäumte Bauteile mit weniger Aufwand auch im Sichtbereich besser einsetzbar wären, würde dies in der Automobilindustrie ein weiteres, wichtiges Argument sein um das Verfahren noch weiter verbreiten zu können.

Dank der vielen überzeugenden Argumente steht dem Schaumspritzgießen in der Automobilindustrie eine positive Zukunft bevor.

Literaturverzeichnis

Altstätter, Volker ; Mantey, Axel (2010):

Thermoplast-Schaumspritzgießen – 1. Aufl. München : Hanser, 2010

Guido, Jakob (2014):

Spritzgießmaschine. URL: www.gojakob.de/pages/lexikon/q---z/spritzgiessmaschine.php, verfügbar am 10.10.2014

Handschke, Andreas ; Mitzler, Jochen (2012):

Physikalisches Schäumen ganz leicht gemacht. URL: www.kraussmaffei.com/media/files/kmdownloadlocal/de/Physikalisches_Schaeumen_102012.pdf, verfügbar am 15.10.2014

Heesen, Bernd (2010):

Investitionsrechnung für Praktiker - Fallorientierte Darstellung der Verfahren und Berechnungen – 1. Aufl. Heidelberg : Gabler, 2010

IFC, Composite (2014):

Leichtbau ist Zukunft. URL: www.ifc-composite.de/index.php?id=10, verfügbar am 16.09.2014

Jaroscheck, Christoph (2013):

Spritzgießen für Praktiker – 3. Aufl. München : Hanser, 2013

Kraus, Maffei (2014):

Schäumen mit CellForm: Mit Leichtigkeit wirtschaftlich. URL: www.kraussmaffei.com/media/files/kmdownloadlocal/de/IMM_BR_CellForm_de.pdf, verfügbar am 09.10.2014

Plastiker (2014):

KIMW - Neues Verbundprojekt zum Thermoplast-Schaumspritzguss, 2011. URL: plasticker.de/Kunststoff_News_15567_KIMW_Neues_Verbundprojekt_zum_Thermoplast_%20Schaumspritzguss, verfügbar am 16.12.2014

Pollmann (2014):

Kunststoffsäumen bei Pollmann. URL: www.pollmann.at/fileadmin/downloads/fertigung/de/1107_Schaeumen.pdf, verfügbar am 25.12.2014

Rees, Jürgen (2014):

Leichtbau: Wie Autos abspecken. URL: www.zeit.de/auto/2012-12/leichtbau-auto-sprit, verfügbar am 16.09.2014

Roch, Alexander (2014):

Thermoplast-Schaum-Spritzgießen (TSG). URL: www.ict.fraunhofer.de/content/dam/ict/de/documents/infoblaetter/PE_TP_Thermoplastschaumspritzgie%C3%9Fen_D.pdf, verfügbar am 25.10.2014

Stitz, Siegfried ; Keller, Walter (2004):

Spritzgießtechnik: Verarbeitung – Maschine – Peripherie – 2. Aufl. München: Hanser, 2004

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Schwoich, den 30.01.2015

Wolfgang Schuler